



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**OPTIMALIZACE PROCESU LISOVÁNÍ KULIČEK DO TĚLES
VSTŘIKOVAČŮ**

OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF PRESSING BALLS INTO THE INJECTOR BODY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petra Kadlecová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Brandejs, CSc.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Studentka: **Petra Kadlecová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jan Brandejs, CSc.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Optimalizace procesu lisování kuliček do těles vstřikovačů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro vstřikování paliva do naftových motorů je nejčastěji využíván systém Commonrail. Předmětem zkoumání je kulička, která se používá pro zaslepení bočního vrtaného kanálu vstřikovače. Zalisovaná kulička musí odolávat zpětnému tlaku 20 barů.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je ověření vlivu elektrického a hydraulického lisování kuliček pro zaslepení kanálu.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- teoretické zhodnocení hlavních faktorů ovlivňujících lisovací proces,
- praktické ověření teoretických předpokladů,
- výpočet minimální a maximální lisovací a vylisovací síly v závislosti na přesahu.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, Ch.R., BUDYNAS, R.G.: Konstruování strojních součástí. Překlad 7. vydání, VUTUM, Brno 2010, 1186 s, ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce pojednává o lisovací stanici montážní linky firmy Bosch Diesel v Jihlavě, na které probíhá zaslepování technologického otvoru v tělese vstřikovače zalisováním kuličky s přesahem. Cílem práce je odhalit pomocí několika testů příčinu velkého procenta výpadků na stanici, ověřit vliv změny lisovací rychlosti nebo mazadla na průběh lisování a porovnat schopnosti hydraulického a elektrického lisu.

KLÍČOVÁ SLOVA

lisování, přesah, tlakový spoj, vstřikovač

ABSTRACT

This thesis is focused on a pressing station as a part of the assembly line in the Bosch Diesel plant in Jihlava. The station provides sealing of a hole in the injector body by ball pressing in. By using several tests the thesis finds out a reason of large amount of waste pieces, checks how can pressing-speed change or lubricant change influence the pressing process itself and compares capabilities of hydrolic vs. electric pressing machine.

KEY WORDS

pressing, overlap, press fit, injector

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KADLECOVÁ, P. *Optimalizace procesu lisování kuliček do těles vstřikovačů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 52 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Brandejs, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Jana Brandejse, CSc. a Jana Pubala. Všechny použité zdroje jsou uvedeny v seznamu na konci práce.

V Brně dne 18. 5. 2017

.....
Petra Kadlecová

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala pánům doc. Ing. Janu Brandejsovi, CSc. a Janu Pubalovi za cenné rady a připomínky v průběhu práce a rodičům za podporu a zázemí během studia. Poděkování za podporu při práci na praktické části patří i pracovníkům firmy Bosch Diesel v Jihlavě.

OBSAH

ÚVOD	12
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	13
1.1 Lisování za studena	13
1.2 Zalisování	13
1.3 Lisy	13
1.4 Zaslepování otvoru	14
1.5 Tření	15
1.6 Mazání	15
1.7 Common Rail systém	16
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE	19
3 MATERIÁLY A METODY	20
3.1 Lisování	20
3.1.1 Použité stroje:	20
3.1.2 Soubor vzorků	21
3.1.3 Lisovací testy – příprava.....	22
3.2 Vylisování.....	24
3.2.1 Vylisovací testy - příprava.....	24
4 VÝSLEDKY	26
4.1 Test č. 1 – Porovnání lisů	26
4.1.1 Porovnání lisovacích křivek	27
4.1.2 Vyhodnocení lisovacích sil v závislosti na přesahu pro lisování	28
4.1.3 Porovnání vylisovacích křivek a sil.....	31
4.2 Test č. 2 – Porovnání lisovacích rychlostí.....	32
4.2.1 Porovnání lisovacích křivek	32
4.2.2 Vyhodnocení lisovacích sil v závislosti na přesahu pro lisování	34
4.2.3 Porovnání vylisovacích křivek a sil.....	35
4.3 Test č. 3 – Porovnání mazadel.....	37
4.3.1 Porovnání lisovacích křivek	37
4.3.2 Vyhodnocení lisovacích sil v závislosti na přesahu pro lisování	39
4.3.3 Porovnání vylisovacích křivek a sil.....	41
4.4 Výpočet lisovací síly v závislosti na přesahu pro lisování	42
5 DISKUZE	46
6 ZÁVĚR.....	49
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	50
8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ.....	51
9 SEZNAM TABULEK	52

ÚVOD

Potřeba zaslepení otvoru se objevuje u mnoha komponent obsahujících kapalinu nebo plyn pod tlakem. Často je pro zjednodušení výroby přistoupeno k propojení kanálků uvnitř komponenty otvorem vyvrtaným z vnějšku. Užitečná je potom ale pouze propojující část tohoto otvoru. Je nežádoucí, aby médium vytékalo ven. Zaslepení otvoru se dá poměrně snadno realizovat pomocí zalisování součástí s přesahem do otvoru. Toto zaslepení by mělo znovu umožnit natlakování média uvnitř komponenty, je tedy nutné, aby vzniklý spoj odolával určitému zpětnému tlaku a aby těsnil. Druhů součástí zajišťujících zaslepování otvorů v těle hydraulické/pneumatické komponenty je na trhu více, předmětem této práce, která byla vypracována ve spolupráci firmy Bosch Diesel, je však vstřikovač pro dieselový systém, kde se k zaslepení využívají již řadu let kuličky, které jsou vyráběné primárně do ložisek.

Kuličky představují jednoduché řešení problému zaslepení otvoru bez nutnosti orientace lisované součástky před montáží. V Jihlavském závodě firmy Bosch se využívají i pro zaslepování pomocných vrtaných kanálků v tělesech vysokotlakých čerpadel.

Lisovací stanice, na které se operace zaslepení provádí, je problémovým článkem montážní linky. Tato práce má za cíl odhalit příčinu výpadků a poukázat na možné způsoby zlepšení lisovacího procesu.

1.1 Lisování za studena

1.1

jedná se o zpracování materiálu tlakem za studena bez odběru třísek pomocí lisů, tedy zařízení vytvářející pracovní tlak potřebný k deformaci lisovaného materiálu. Lze tak provádět složité operace jednoduchými údery lisu a vyrábět součásti komplikovaných tvarů, které jsou mnohdy jinými způsoby obtížně vyrobitelné nebo dokonce nevyrobitelné. Lisování dále umožňuje vyrábět vyměnitelné součásti s dostatečně přesnými rozměry bez nutnosti dalšího strojního obrábění.

Vedle běžných tvářecích operací prováděných pomocí lisů za studena, jako je tažení, ohýbání, stříhání, pěchování, protlačování, ražení atp. řadíme mezi lisovací operace také montážní lisování, tedy spojování součástí pomocí lisování.

Lisovaný montážní spoj je realizován díky elastickým a plastickým deformacím materiálu jednoho nebo obou spojovaných objektů. Většinou se jedná o pevné nerozebíratelné spoje (nýtování, svařování za studena, lemování, zahýbání, zužování, rozšiřování). Zalisováním a ohnutím jazýčků nebo patek vznikají rozebíratelné spoje.[1][2]

1.2 Zalisování

1.2

Jedná se o spojení dvou součástí s přesahem. Postupným deformováním jedné nebo obou spojovaných součástí dojde k vytvoření tlakového spoje a ke vzniku kontaktního tlaku ve stykové ploše. [1]

Podstatou tlakového spoje je tření ve stykové ploše spojovaných součástí. Spojení je dosaženo přesahem mezi nimi. Tlakového spoje lze docílit buď násilným natlačením hřídele do náboje pod lisem (lisování podélné/za studena), nebo nasunutím součástí po předchozím ohřevu náboje či ochlazení hřídele (lisování příčné/za tepla). Spoj vytvořený lisováním za tepla vykazuje větší únosnost a spolehlivost než lisování za studena. Na únosnost spoje má vliv délka spoje, způsob lisování (lisování za tepla zvýší únosnost 1.5x), součinitel tření, přesah. Při velkých přesazích při lisování však vzniká riziko prasknutí vnější součásti a také dochází k většímu stržení a vyhlazení nerovností během lisování, což má za následek naopak snížení únosnosti spoje. [3][4]

1.3 Lisy

1.3

K operaci lisování slouží lisovací stroje – lisy. Rozlišujeme lisy mechanické, hydraulické, pneumatické, elektrické, elektromagnetické.

Hydraulické lisy pracují na principu Pascalova zákona o rovnoměrném šíření tlaku v kapalinách. Pracovní kapalinou je tlakový olej. Oproti mechanickým přinesly hydraulické lisy nespočet výhod. Zajišťují plynulou rychlost operace během celého zdvihu, síla lisu nezávisí na poloze výchozího bodu vzhledem k úvrati (u mechanických lisů závisí na úhlu pootočení kliky) a nevznikají nárazy při styku nástroje s materiálem. [1][5]

Elektrické lisy, jejichž pohon zajišťuje servomotor a pohybový šroub, dosahují v porovnání s hydraulickými lisy ještě plynulejších průběhů lisovacích operací,

nevznikají tlakové rázy, jsou méně hlučné, umožňují mnohem lepší regulaci, což má význam hlavně u lisování součástí, u kterých má přednost přesnost před hrubou silou. Elektrické lisy díky servopohonu zaručují téměř 100% shodu při opakování stejného úkonu. Oproti hydraulickým lisům jsou naopak i několikanásobně dražší. [6][7]

1.4 Zaslepování otvoru

Lee Plug[®]

Zaslepovací zátky od firmy *Lee* k utěšňování kanálků v součástech pneumatických nebo hydraulických systémů se vyrábějí v rozměrech od 2,5 mm do 8,0 mm v provedení z nerezové oceli nebo hliníku.

Lee Plug tvoří dvě části:

- objímka s drážkami po vnějším obvodu
- zátka

Do otvoru, který je třeba zaslepit, se nejprve vloží objímka, do níž se následně nasune zátka tak, aby byly horní okraje zátky a objímky v jedné rovině. K tomu je zapotřebí určitá síla, jelikož zátka je mírně kuželovitá. Při zasouvání zátky do objímky v otvoru vnikají drážky na vnějším povrchu objímky do stěn zaslepovaného otvoru, čímž je zajištěn těsnící spoj. Postup znázorňuje obrázek 1.1.



Obr. 1.1 Vlevo: Instalace Lee Plug do otvoru, vpravo: detail drážkování [8]

Vzniklý spoj je možné v případě potřeby demontovat. Ke každému rozměru je vyrobena o 0,25 mm větší varianta, což umožňuje opětovnou instalaci Lee Plug do téhož otvoru.[8]

Avseal[®]

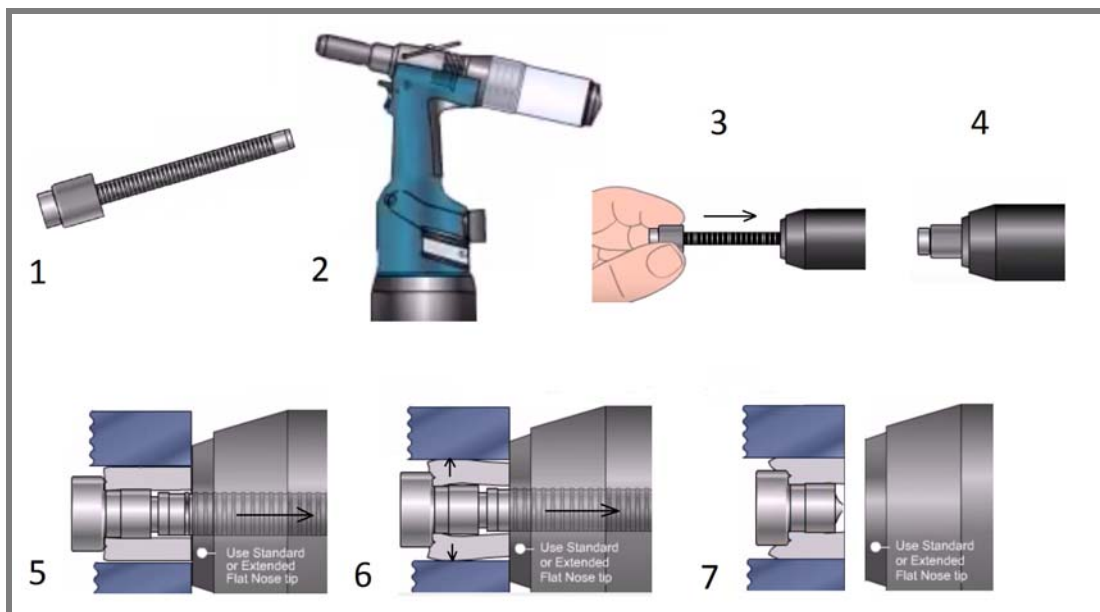
Zaslepovací zátky od firmy *STANLEY Engineered Fastening* byly vyvinuty jak pro nízkotlaké (průměr 9 až 16 mm), tak vysokotlaké systémy (průměr 4 až 12 mm).

Avseal tvoří 2 části:

- kolíček se závitem
- vnější těsnicí část

Po vsunutí Avseal do otvoru a přitahování kolíčku, jehož konec vniká do materiálu vnější části zátky, dochází k deformaci v radiálním směru a postupnému ucpání otvoru materiálem zátky. Při dosažení určité síly se závitová část kolíčku odtrhne, přičemž těsnicí část zátky drží pevně v otvoru.

Na rozdíl od Lee Plug je k instalaci třeba speciální nářadí. Instalace zátky do otvoru je znázorněna na obrázku 1.2. [9]



Obr. 1.2 Instalace Avseal zátky; 1 – dvoudílná Avseal zátka, 2 – přístroj na instalaci zátek, 3 – zasunutí zátky do přístroje uží stranou (koleček), 4 – zátka v přístroji připravena k instalaci, 5 – Avseal v otvoru, 6 – rozpínání vnější části zátky v důsledku tahu vyvíjeného na koleček, 7 – odtržení pomocné části kolečku – otvor je zaslepen [9]

1.5 Tření

1.5

Tření je fyzikální jev, který vzniká při posouvání (smýkání) jednoho tělesa po povrchu jiného tělesa. Tyto povrchy se ale dotýkají pouze lokálně – v místech výstupků, protože žádný povrch není ideálně hladký. Tyto nerovnosti jsou právě příčinou vzniku tření, při posouvání těles na sebe vzájemně narážejí, deformují se a obrušují. Dochází i k lokálnímu spojování a následnému odtrhování. Tak vzniká třecí síla, jejíž působíště je na stykové ploše obou těles a jejíž směr míří vždy proti směru rychlosti. K největšímu tření dochází, pokud se po sobě smýkají dva stejné materiály, vznikající spoje jsou pevnější. [10][11]

Snížení třecích sil nedosáhneme pomocí změny obsahu styčných ploch ani rychlosti, jelikož na nich třecí síla nezávisí. Třecí síla přímo úměrně závisí na třecím koeficientu a přítláčné normálové síle. Třecí koeficient lze snížit mazáním. [11]

1.6 Mazání

1.6

Kromě snižování tření slouží mazání k odvodu tepla a brání opotřebení.

Rozlišujeme tyto režimy mazání:

- hydrodynamické – třecí povrchy jsou odděleny poměrně silným mazacím filmem a nedochází k jejich vzájemnému styku, nedochází tedy k opotřebení povrchů; v důsledku relativního pohybu třecích povrchů, kdy je mazivo unášeno do zúženého prostoru, je vytvářen v mazacím filmu tlak; pokud vzájemná rychlost dosahuje dostatečně velkých hodnot, dojde k vytvoření protitlaku a mazací film je tak schopen přenášet zatížení působící na třecí povrchy

- hydrostatické – mazivo je pod velkým tlakem přiváděno mezi třecí povrchy a ty jsou od sebe oddělovány relativně silným mazacím filmem (např. u ložisek s velmi malou až nulovou rychlostí třecích povrchů)
- elastohydrodynamické – mazivo je vtahováno mezi třecí povrchy, které se po sobě odvalují (spoluzabírající ozubená kola, ložiska)
- mezné – při protržení souvislého mazacího filmu (hydrodynamické či elastohydrodynamické mazání) jsou od sebe třecí povrchy odděleny vrstvou o tloušťce několika molekul; dochází k němu při nedostatečné velikosti mazaného kontaktu, snížení rychlosti třecích povrchů, při poklesu množství dodávaného maziva, zvýšení zatížení nebo při nárůstu teploty maziva a snížení jeho viskozity, přičemž přechod k meznému mazání není náhlý, ale při přibližování třecích povrchů dochází nejprve ke mazání smíšenému
- tuhými mazivy – na rozdíl od předchozích režimů, kdy se k mazání používají minerální oleje jsou v tomto případě aplikována tuhá maziva (grafit, disulfid molybdeničitý), která jsou schopna odolávat extrémním teplotám

V případě hydrodynamického mazání se veškeré zatížení přenáší na mazivo a třecí koeficient je daný pouze druhem maziva. Mírou vnitřního tření tekutiny je viskozita η (dynamická viskozita, absolutní viskozita, viskozita). Pokud si mazací film představíme jako soustavu vodorovných vrstev, přičemž rychlost vrstvy sousedící s pohybujícím se povrchem se rovná rychlosti tohoto povrchu a vrstva sousedící s nepohyblivou vrstvou má rychlost nulovou, je smykové napětí v tekutině mezi jednotlivými vrstvami přímo úměrné změně rychlosti se vzdáleností y (y je vzdálenost určité vrstvy od povrchu, y dosahuje hodnot 0 až h , kde h je vzdálenost třecích povrchů). Koeficientem úměrnosti je právě viskozita η :

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}$$

Člen dv/dy (smykový spád) je gradient rychlosti v kolmém směru na pohyb tekutiny. Tekutiny, které mají smykový spád konstantní, nazýváme newtonovské. Jednotkou viskozity je Pa·s. S rostoucí teplotou její hodnota klesá.

Někdy se používá i viskozita kinematická ν , jejíž jednotkou je m^2/s . Ta je definovaná jako poměr viskozity η a hustoty tekutiny ρ při dané teplotě. [1][12]

1.7 Common Rail systém

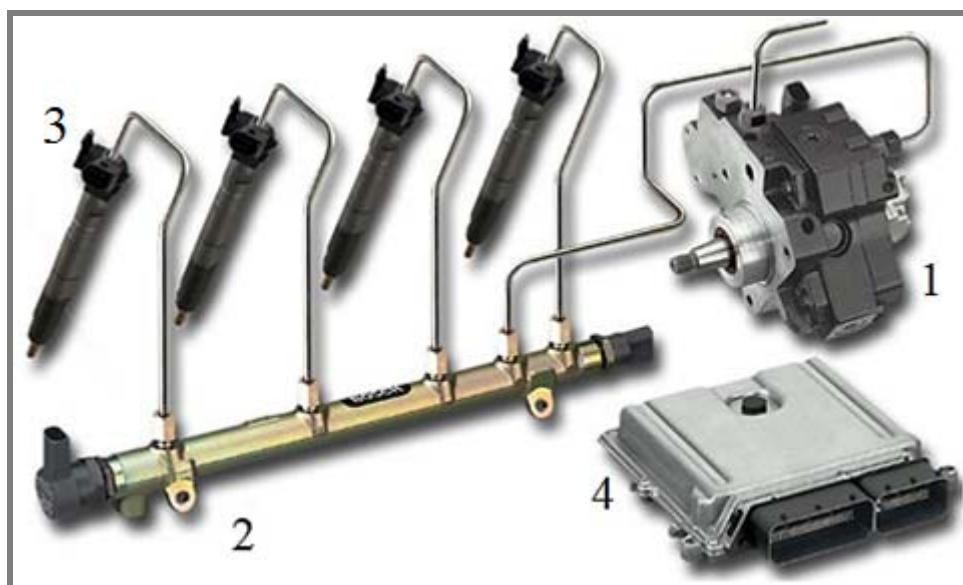
Systém Common Rail v současné době představuje nejrozšířenější systém vstřikování paliva u vznětových motorů, jedná se o elektronicky řízený systém dodávky paliva elektromagnetickým nebo piezoelektrickým vstřikovačem. Umožňuje dosažení vyšších tlaků, rychlejších spínacích časů, nižší spotřebu paliva, tišší chod motoru s menším množstvím emisí.

Od počátku vývoje vstřikovacího systému Common Rail došlo k několika inovacím. Jednotlivé generace se převážně liší typem použitého vysokotlakého čerpadla, způsobem regulace tlaku a použitím určitého typu vstřikovačů. Vše je patrné z tabulky 1.1.

Tab. 1.1 Generace čerpadel a vstřikovačů systému Common Rail [13][14]

Generace	Maximální tlak	Vysokotlaké čerpadlo	Vstřikovač
1. Generace	1450 bar	CP1 - regulace tlaku na straně vysokého tlaku regulačním tlakovým ventilem	Vstřikovač s elektromagnetickým ventilem
2. Generace	1600 bar	CP2 - regulace množství na straně sání s dvěma elektromagnetickými ventily	Vstřikovač s elektromagnetickým ventilem
3. Generace	1800 bar	CP3 - dávkovací jednotka (škrťací ventil)	Piezoelektrický vstřikovač inline
4. Generace	2050 bar	CP4 - regulace množství na straně sání s dávkovací jednotkou	Hydraulicky posilovaný vstřikovač

Na rozdíl od dříve používaných vstřikovacích systémů, Common Rail (CR) vytváří tlak paliva nezávisle na otáčkách motoru vysokotlakým čerpadlem (Obr. 1.3-1), které tvoří přechod mezi nízkotlakou a vysokotlakou částí systému. K sacímu kanálu vysokotlakého čerpadla je palivo dopravováno podávacím čerpadlem. Vysokotlaké čerpadlo pak plní palivem společný zásobník (rail – Obr. 1.3-2) pod velmi vysokým tlakem. V zásobníku zůstává palivo trvale stlačené a je prostřednictvím vysokotlakých potrubí přiváděno k jednotlivým vstřikovačům (Obr. 1.3-3), které odměřují potřebné množství paliva pro každý válec motoru. Výhodou tohoto koncepčního řešení je, že palivo nemusí být stlačováno v průběhu vstřikování. Počátek vstřiku a vstřikované množství jsou řízeny elektromagnetickým ventilem, jenž je aktivován impulsem z řídicí jednotky motoru (Obr. 1.3-4). [13][14]



Obr. 1.3 Systém vstřikování paliva Common Rail, 1 – vysokotlaké čerpadlo, 2 – vysokotlaký zásobník, 3 – vstřikovače, 4 – řídicí jednotka

Funkci vstřikovače při běžícím motoru lze rozdělit do čtyř etap:

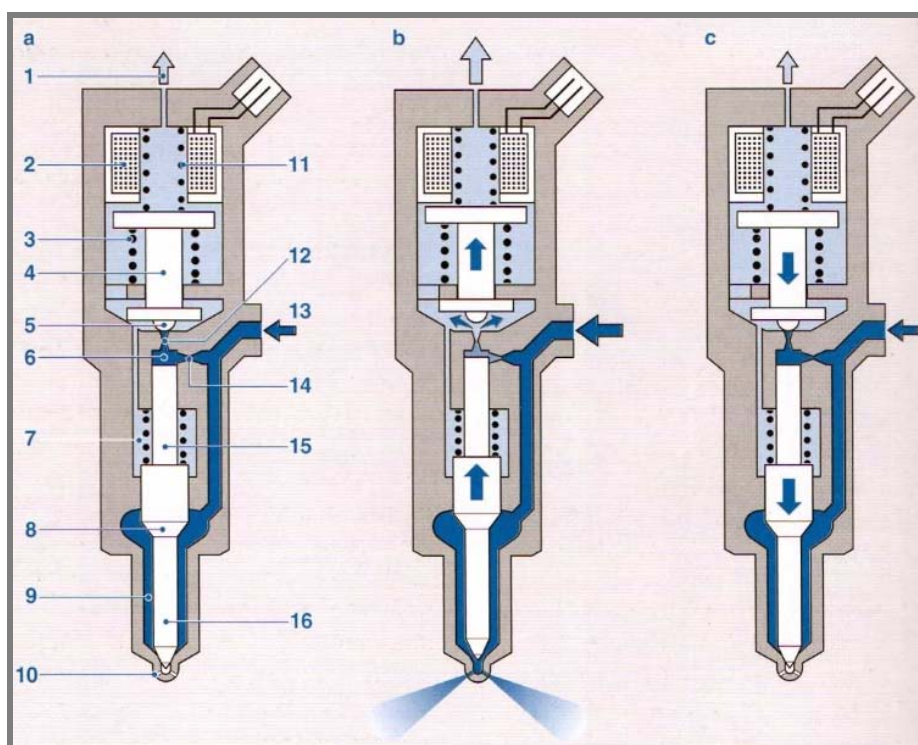
Vstřikovač je uzavřen (Obr. 1.4a) – Kulička ventilu (5) je do sedla škrcení na přechodu do nízkotlaké části přitlačována pružinou (11) přes kotvu (4). V řídicím prostoru ventilu (6) se nachází tlak shodný s tlakem v railu. Tentýž tlak působí v celé

tmavě modré oblasti a působením na čelní plochu pístu (15) drží jehlu trysky uzavřenou.

Vstřikovač se otvírá (Obr. 1.4b) – Elektromagnetický ventil je aktivován proudovým impulsem z řídicí jednotky a překoná tak sílu ventilové pružiny (11). Kotva (4) se nadzvedne a natlakované palivo v prostoru (6) má snahu téci přes kuličku, která nyní volně leží v sedle, do nízkotlaké oblasti. Tlak v řídicím prostoru (6) náhle poklesne. V objemu komory trysky (9) se však stále nachází vysoký tlak, který překoná sílu přitlačné pružiny (7). Jehla trysky se nadzvedne a začíná vstřikování. Rychlost zdvihu je udávána Rozdílem průtoku mezi škrcením na přívodu (14) a na odvodu (12).

Vstřikovač je zcela otevřen - Tryska vstřikovače je nyní plně otevřena a palivo se vstřikuje téměř pod tlakem odpovídajícím tlaku v railu. Vstříknuté množství je úměrné době aktivace elektromagnetického ventilu a je nezávislé na otáčkách motoru.

Vstřikovač se zavírá (Obr. 1.4c) – Elektromagnet je deaktivován, pružina (11) tlačí kotvu směrem dolů, kulička tak uzavírá škrcení na přepadu. Uzavřením škrcení se v řídicím prostoru (6) opět vytvoří vysoký tlak a vyvolá zvýšenou sílu na řídicí píst (15). Jehla je přes píst přitlačena dolů a vstřikovací otvor je uzavřen. [13]



Obr. 1.4 Způsob činnosti vstřikovače s elektromagnetickým ventilem;

a – klidový stav; b – vstřikovač se otvírá, c – vstřikovač se zavírá [13]

- | | | |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 1 – zpětné palivové potrubí, | 6 – řídicí prostor ventilu, | 13 – vysokotlaká přípojka, |
| 2 – cívka elektromagnetu, | 8 – rozšíření jehly trysky, | 14 – škrcení na přívodu, |
| 3,7,11 – pružiny, | 9 – objem komory trysky, | 15 – píst spojený s jehlou trysky, |
| 4 – kotva, | 10 – vstřikovací otvor, | 16 – jehla trysky |
| 5 – kulička ventilu, | 12 – škrcení na odvodu, | |

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE

2

Linka v Jihlavském závodě, jejíž součástí je i stanice na lisování kuliček, je pouze montážní. Všechny potřebné díly jsou odebírány ve finálním stavu od dodavatele. V současné době se zde montují tři generace vstřikovačů, přičemž všechny jsou součástí systému Common Rail. Pouze jedna generace vstřikovačů ze zmíněných tří (nejstarší model) využívá pomocného vrtaného kanálku, který je následně potřeba zaslepit. Na stanici pro zalisování kuliček přijde tedy cca 20 % ze všech dodaných těles. Tělesa vstřikovačů jsou odebírána od dodavatele kompletně obrobena, kalena a fosfátována. U generace, která vyžaduje zaslepení otvoru, následuje jako první montážní operace právě zalisování kuličky. Těleso s kuličkou pak projde celou montážní linkou stejně jako tělesa vstřikovačů ostatních generací, která nemají propojení kanálků realizováno pomocným otvorem z vnějšku.

Stanice představuje problémový článek linky již od počátku výroby v Jihlavě.

Technické oddělení, které má na starosti optimalizaci a vývoj montážních procesů, doporučuje výměnu stávajícího hydraulického lisu za elektrický.

Z finančního hlediska se z počátku zdála přestavba stroje náročnější než odstranění možných problémů stávající stanice, proto bylo přistoupeno hlavně z důvodu nepřípustného počtu zmetků (na začátku až 40 % produkce tohoto typu vstřikovačů) a celkově nevyzpytatelnosti chování stanice, k pokusu o vyřešení problémů s lisovacím procesem provedením několika testů. Některé z nich proběhnou na samotné stanici používané na montáži, zbytek bude proveden na elektrickém lisu v technickém úseku závodu, který slouží pro realizaci podobných testů.

Hlavním výstupem práce je odhalení příčiny vysokého počtu výpadků. Za tímto účelem byly navrženy testy, které mají za úkol porovnat schopnosti stávajícího lisu s lisem elektrickým. Testy dále pomohou odhalit, do jaké míry ovlivňuje změna mazadla či lisovací rychlosti průběh lisování. Díky důkladnému proměření těles na počátku bude možné posoudit významnost vlivů jednotlivých parametrů definovaných ve výkresech na lisovací křivky, případně i na výpadkovost stanice při sériové montáži.

3 MATERIÁLY A METODY

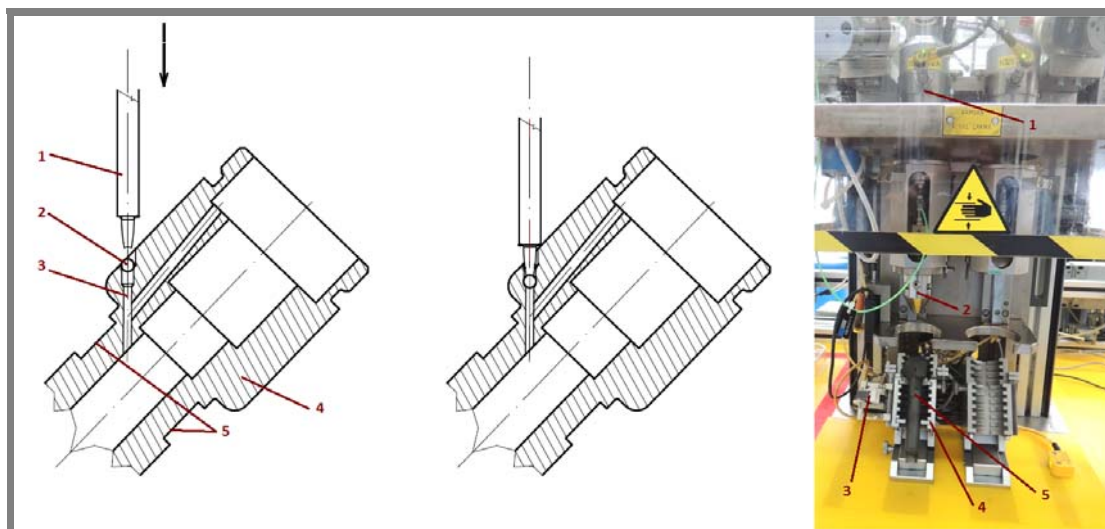
3.1 Lisování

3.1.1 Použité stroje:

Hydraulický lis (součást výrobní linky vstřikovačů, rok výroby 2004):

- jmenovitá síla: 10kN, maximální zdvih: 120 mm, maximální tlak: 150 bar, průměr pístu: 32 mm

Součástí stanice je přípravek držící vstřikovač v takové poloze, aby osa otvoru pro kuličku byla v ose s lisovacím trnem. Těleso je vsazeno do přípravku a je polohováno za vyfrézované upínací plochy. Součástí přípravku je přitlačná páčka, která těsně před sjížděním lisovací hlavy zajistí těleso vůči možnému pohybu při lisování (Obr. 3.1).

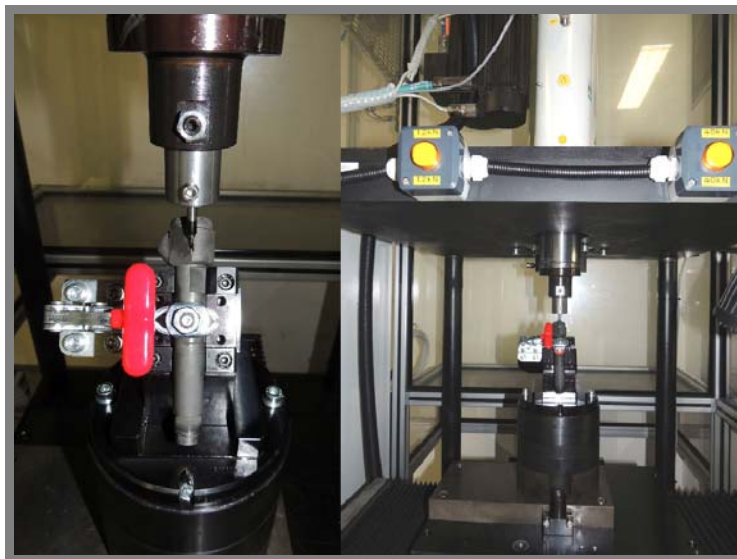


Obr. 3.1 Vlevo: Schéma lisování; 1 - lisovací trn, 2 - kulička, 3 - zaslepovaný kanálek, 4 - těleso vstřikovače, 5 - upínací plochy, vpravo: Upnutí vstřikovače v přípravku hydraulického lisu; 1 - lis, 2 - lisovací hlava, 3 - přitlačná páčka, 4 - upínací přípravek, 5 - těleso vstřikovače

Elektrický lis (testovací lis na technickém oddělení, rok výroby: 2012):

- jmenovitá síla: 12 kN, maximální zdvih: 200 mm, maximální lisovací rychlost: 240 mm/s, maximální zrychlení 2000 mm/s²

Upínací přípravek ze sériové stanice nebylo možné použít pro elektrický lis z důvodu rozdílných upínacích rozměrů. Proto byl pro testy na elektrickém lisu vyroben zvláštní přípravek (Obr. 3.2).



Obr. 3.2 Upnutí vstřikovače v přípravku v elektrickém lisu

3.1.2 Soubor vzorků

3.1.2

Před začátkem praktické části bylo třeba vytvořit soubor vzorků k testování.

Předmětem zkoumání jsou tělesa vstřikovačů ve stavu, v jakém byly přijaty od dodavatele. Materiál je ocel 1.1201 (C45RPb), tělesa jsou kalena: tvrdost na povrchu 290 HB, v jádře 240 HB [1].

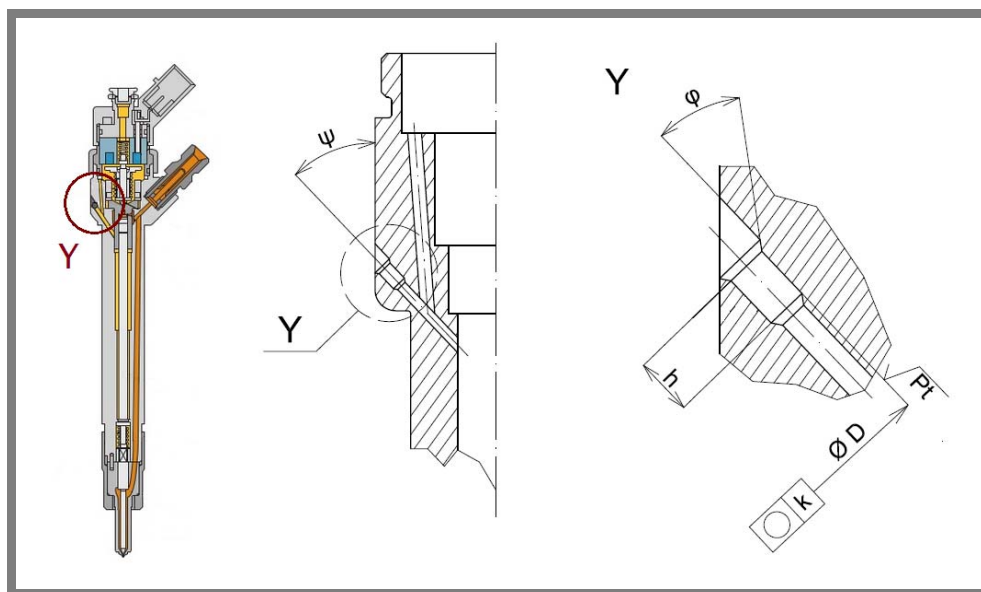
Pro zajištění limitních přesahů byla na zakázku vyrobena těla vstřikovačů s otvory o průměru mírně za hranicemi tolerančního pole:

- nejprve byl spočítán nejmenší a největší přesah z dolních a horních rozměrů kuliček a těles daných ve výkresové dokumentaci
- ze souboru asi 50 kuliček používaných ve výrobě byla vypočítána průměrná hodnota průměru
- od této průměrné hodnoty byl odečten největší dříve vypočítaný přesah a výsledkem byl minimální průměr otvoru, pro který by byl ještě zajištěn největší možný přesah při použití průměrné kuličky
- podobně byl od průměrné hodnoty odečten nejmenší vypočítaný přesah, což vedlo k maximálnímu možnému průměru otvoru při dosažení nejmenšího přesahu pro lisování průměrné kuličky

Výroba 48 limitních kusů pak byla objednána tak, aby otvory pro kuličku měly právě tyto vypočtené průměry. Ostatní tělesa pocházela ze sériové výroby.

Vznikl tak soubor 216 kusů, na kterých byly proměřeny parametry týkající se otvoru pro kuličku, které jsou předepsány na výkrese a které by mohly mít souvislost s průběhem lisovacích křivek – průměr D a kruhovitost k otvoru pro kuličku, jeho celková hloubka h , drsnost povrchu P_t , úhel náběhové hrany φ a úhel sklonu otvoru ψ (Obr. 3.3). Toto proměření má za úkol prověřit dodržení předepsaných tolerancí a případně odhalit chyby z výroby samotných těles. Úhel náběhové hrany a hloubka otvoru byly kvůli časové náročnosti měření proměřeny pouze namátkově u 38 kusů.

U kuliček, které jsou také odebírány od dodavatele, byl proměřen průměr d . Kuličky jsou vyrobeny z oceli na valivá ložiska a prokaleny (tvrdost dosahuje 60-66 HRC, případně 647-770 HB) [1].



Obr. 3.3 Detail umístění otvoru pro kuličku na vstřikovači a vyznačení měřených parametrů

Geometrie otvorů i kuliček odpovídá předepsaným hodnotám z výkresové dokumentace až na hodnoty úhlu náběhové hrany, které až šestinásobně překračují rozsah tolerančního pole. Tyto kusy zatím nevyřazujeme, nedodržení úhlu může být zohledněno při vyhodnocování jeho vlivu na lisování.

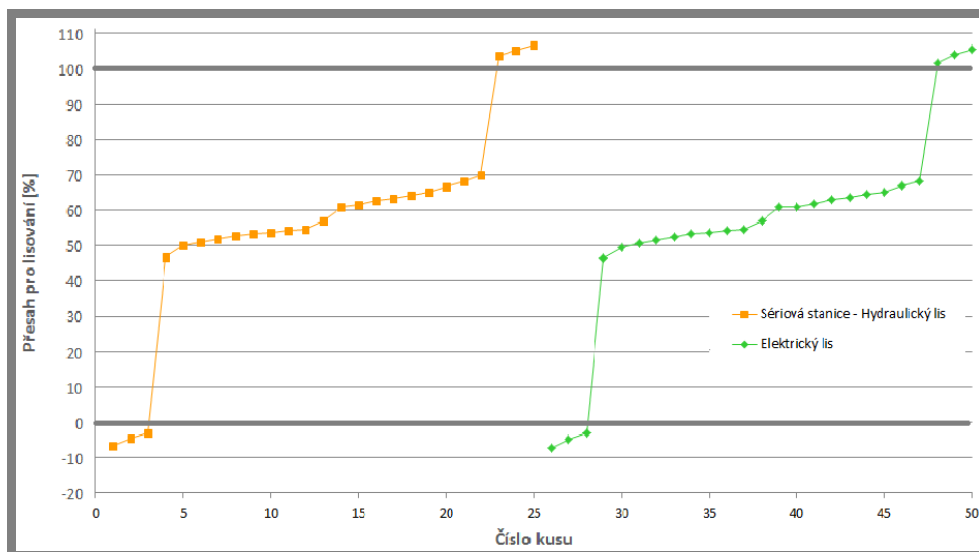
Rozměřené kusy byly rozřazeny podle přesahu do sedmi skupin po 25 kusech tak, aby skupiny byly pokud možno přesahově srovnatelné, tedy aby v každé byly zástupci jak z kategorie vysokého přesahu, tak nízkého. Vzhledem k tomu, že průměry kuliček jsou až na pár výjimek ve středu tolerančního pole, rozhoduje o přesahu hlavně průměr otvoru v tělese. Extrémní přesahy jsou tvořeny na zakázku vyráběnými limitními kusy, které by se do sériové výroby neměly běžně dostat. Tím bude ověřeno, jak citlivě lis reaguje na přesahy, které jsou až za hranicemi předepsaného ideálního rozsahu. Tyto páry budou také hrát významnou roli při výpočtu lisovací a vylisovací síly.

3.1.3 Lisovací testy – příprava

Test č. 1: Ověření vlivu lisů (Obr. 3.4):

Polovina testu proběhne na hydraulickém lisu přímo ve výrobě. Montáž druhé poloviny kusů bude zajištěna elektrickým testovacím lisem v laboratoři technického oddělení. Oba lisy budou lisovat stejnou lisovací rychlostí 10 mm/s, k mazání bude použit olej používaný ve výrobě.

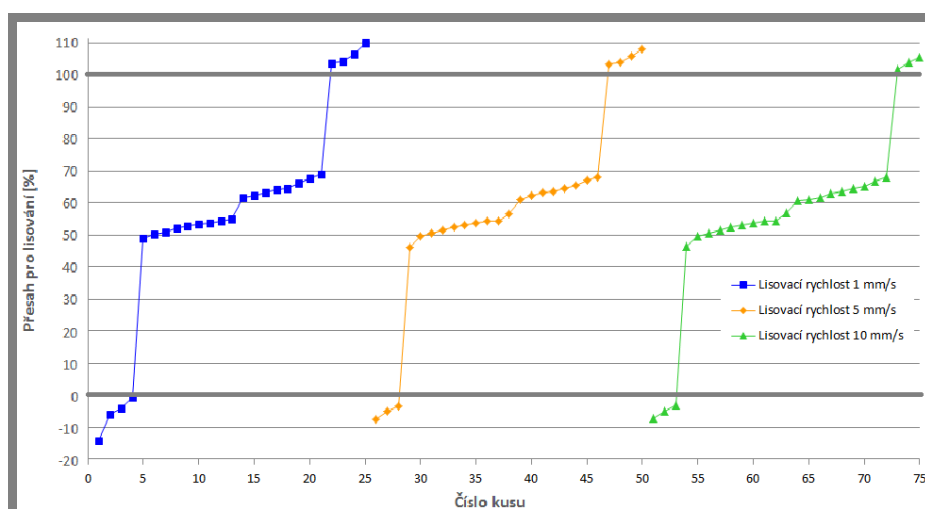
Na obrázku 4 je vidět, že páry sériových těles s kuličkami dosahují vesměs středních přesahů, zviditelnění závislosti lisovacích sil na přesahu umožní limitní kusy, jejichž přesahy po napárování s kuličkami leží těsně za hranicemi výkresem stanoveného rozsahu.



Obr. 3.4 Napárování kusů podle přesahu pro Test č. 1: Ověření vlivu lisů, vodorovnými přímkami procházejícími 0 a 100 % jsou označeny minimální a maximální dosažitelné přesahy podle výkresů

Test č. 2: Ověření vlivu lisovacích rychlostí (Obr. 3.5):

Pro test byly na základě zkušeností specialisty na lisování zvoleny 3 lisovací rychlosti 1 mm/s, 5 mm/s a 10 mm/s. Celý test proběhne na elektrickém lisu, který umožňuje snadnou a hlavně přesnou regulaci lisovací rychlosti. Výsledky lisování rychlostí 10 mm/s budou použity z testu č. 1 (zelená křivka). K mazání bude opět jako v prvním testu použit olej ze sériové stanice.

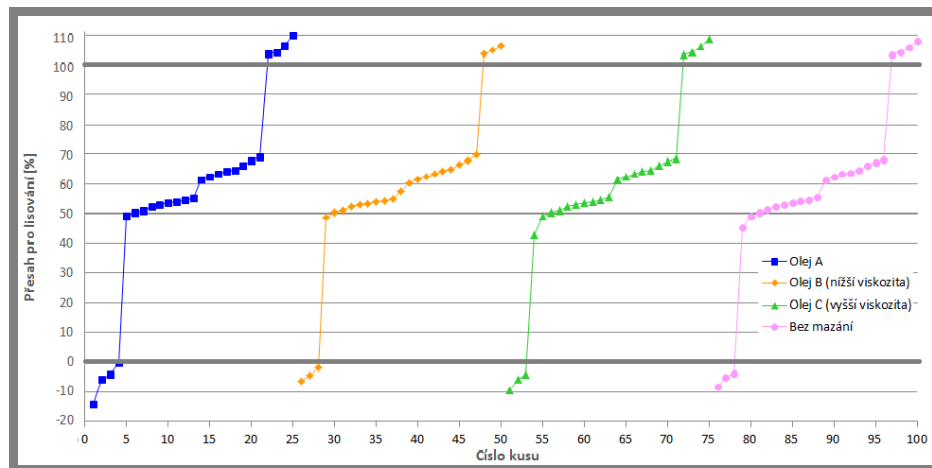


Obr. 3.5 Napárování kusů podle přesahu pro Test č. 2: Ověření vlivu lisovacích rychlostí, vodorovnými přímkami procházejícími 0 a 100 % jsou označeny minimální a maximální dosažitelné přesahy podle výkresů

Hydraulická stanice ve výrobě lisuje rychlostí cca 10 mm/s, významné snížení této rychlosti (přiškrcením tlaku) vede k výpadkům na lisovací proces z důvodu nestability a rázů hydraulického tlaku. Obecně platí, že u hydraulického lisu se se změnou rychlosti nepracuje, protože se obtížně reguluje. Naopak na elektrickém lisu

se lisovací rychlost dá plynule regulovat a nastavovat změnou otáček na krokovém motoru lisu.

Test č. 3: Ověření vlivu mazadel (Obr. 3.6):



Obr. 3.6 Napárované kusy podle přesahu pro Test č. 3: Ověření vlivu mazadel; vodorovnými přímkami procházejícími 0 a 100 % jsou označeny minimální a maximální dosažitelné přesahy podle výkresů

Lisovací předpis pro sériovou stanici doporučuje před lisováním mazat, ale konkrétní mazadlo zde uvedeno není. Pro ověření vlivu typu mazadla na průběh lisování byl kromě oleje A používaného v sériové výrobě zvolen olej B s minimální viskozitou (cca 31,6 krát menší než viskozita oleje A při 40 °C) a olej C, jehož viskozita (taktéž při 40 °C) je cca 2,8 krát větší než viskozita oleje A. Pro zajímavost budou kuličky v poslední skupině zalisovány bez jakéhokoliv mazadla (i přesto, že předpis toto nedovoluje). Celý test proběhne na elektrickém lisu, lisovací rychlost bude 1 mm/s. Výsledky pro mazání olejem z výroby budou převzaty z druhého testu (modrá křivka).

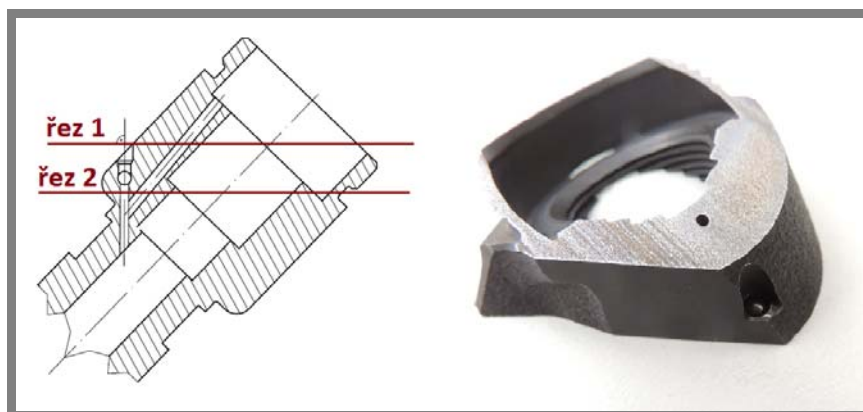
3.2 Vylisování

Kulička zalisovaná v otvoru by měla odolávat zpětnému tlaku 20 bar. V předpise pro lisování kuličky do tělesa vstřikovače je stanovena minimální hodnota vylisovací síly. Splnění tohoto požadavku nelze ověřit bez zničení výrobku. Ve výrobě se tedy pouze vizuálně kontroluje dostatečné zalisování kuličky, což by spolu se správným průběhem lisování mělo zajistit požadované vlastnosti spoje.

Vylisování kuliček proběhne na tomtéž elektrickém lisu, na kterém bylo prováděno lisování.

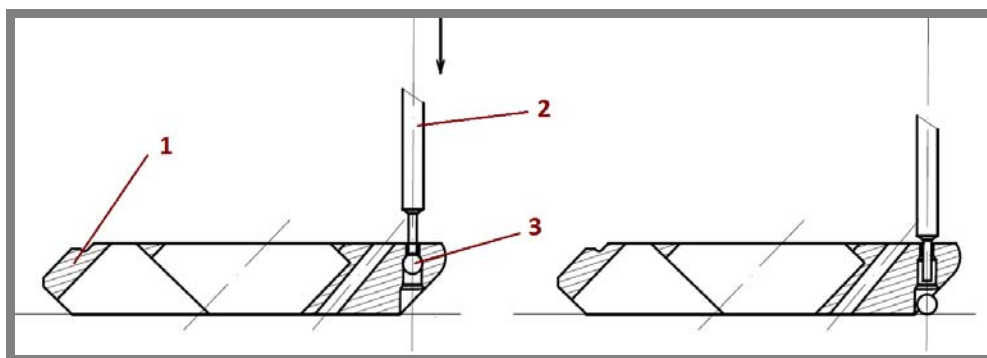
3.2.1 Vylisovací testy - příprava

Pro zajištění přístupu lisovacího trnu ke kuličce zevnitř kanálku je třeba kusy rozřezat (Obr. 3.7).



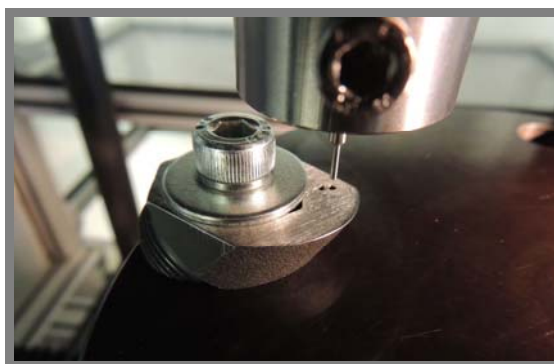
Obr. 3.7 Vyznačení řezných rovin, odřezek pro vylisovací test

Při návrhu řezu bylo bráno v potaz i následné upnutí vzniklé části během vylisování. Řez byl veden kolmo na osu otvoru, výška vzniklého útvaru byla požadována co nejmenší, aby se minimalizovalo riziko zlomení vylisovacího trnu (Obr. 3.8).



Obr. 3.8 Schéma vylisování kuličky; 1 - odřezek, 2 - lisovací trn, 3 – kulička

Upnutí odřezku při vylisování bylo zajištěno podložkou a šroubem (Obr. 3.9).



Obr. 3.9 Upnutí odřezku při vylisování

Test nebude z důvodu náročnosti přípravy vzorků proveden na všech kusech. Z každého testu byly vybrány všechny s extrémními přesahy a doplněny vždy jedním kusem ze středu tolerančního pole.

4 VÝSLEDKY

Hlavním výstupem z lisovací stanice je lisovací křivka, tedy závislost síly vyvinuté při lisování na dráze, kterou lisovací trn urazí od počátku lisování. Počátek lisování je určen nastavením minimální spouštěcí síly – tzv. triggeru. Lisovací hlava začne po spuštění lisu sjíždět a po dotyku lisovacího trnu s lisovanou kuličkou a dosažení minimální nastavené síly (triggeru) se začne průběh lisování zaznamenávat.

V současném lisovacím předpisu ke stanici pro lisování kuliček do těles jsou definována dvě kontrolní okna určující průběh lisovacích křivek tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností lisovaného spoje. Všechny lisovací křivky budou vyhodnocovány vzhledem k těmto kontrolním hodnotám, protože se jedná o hodnoty, podle kterých stanice určuje dobré a špatné kusy. Křivka je v pořádku, pokud protne všechny svislé úsečky obou kontrolních oken. Pokud protne úsečky vodorovné nebo se oknu vyhne, nahlásí stanice zmetek.

Tab. 4.2 Kontrolní okna určující správný průběh lisování

	1. Kontrolní okno		2. Kontrolní okno	
	vstup	výstup	vstup	výstup
dráha	0,4 mm	0,5 mm	1,2 mm	1,3 mm
síla	14 až 36 % F_{\max}		26 až 48 % F_{\max}	

V předpisu je také uveden rozsah maximální lisovací síly, při které by již mělo být zajištěno předepsané spojení. Tato síla by měla být dosažena, ale ne překročena - hrozí poškození spojovaných součástí a lisovacího trnu.

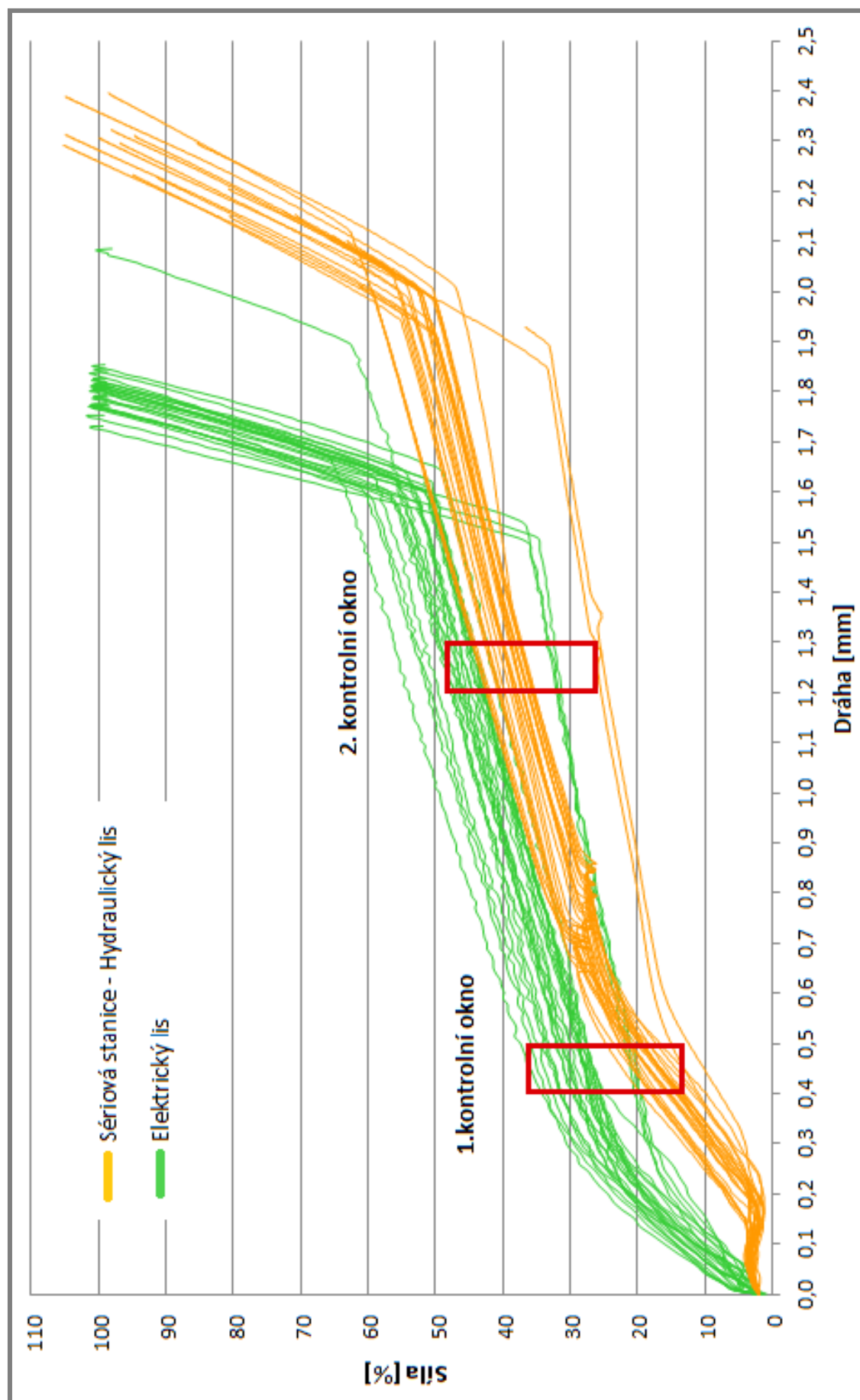
Důležitým místem je zlom v pravé části křivky, po kterém síla začíná prudce narůstat. Tento zlom indikuje dosednutí kuličky na dno otvoru. Může se stát, že křivka skončí ještě před zlomem, avšak pokud křivka projde oběma okny, není kus stanicí vyřazen. Pozici kuličky kontroluje ve výrobě vizuálně pracovník stanice, přesnější informaci přináší pouze rozřezání vstřikovače, ve výrobě se tento výkon neprovádí.

Jako doplněk k lisovacím křivkám se vykreslují závislosti lisovacích sil na přesahu v jednotlivých kontrolních oknech, a to na vstupu i výstupu.

Výstupem z vylisovacího testu je vylisovací křivka (závislost síly na dráze), jejíž průběh je kontrolován pouze minimální hodnotou vylisovací síly stanovené v předpise. Tuto hodnotu musí každá křivka překročit, aby byla zajištěna dostatečná těsnost spoje.

4.1 Test č. 1 – Porovnání lisů

Test zčásti probíhal na sériové stanici ve výrobě, zčásti na elektrickém testovacím lisu na technickém oddělení. Pro každý lis byla určena jedna skupina dílců napárovaných podle přesahu, celkem 50 ks.



Obr. 4.1 Test č. 1 - Lisovací křivky

4.1.1 Porovnání lisovacích křivek

Lisovací křivky získané z lisování na elektrickém a hydraulickém lisu (Obr. 4.1) se zásadně liší v celém průběhu, největších rozdílů si lze všimnout při náběhu křivky do prvního kontrolního okna a při dolisování. U elektrického lisu začne po dosažení minimální síly (triggeru) síla okamžitě narůstat směrem k prvnímu kontrolnímu oknu. Křivky zaznamenané při lisování na hydraulickém lisu zůstávají po spuštění záznamu cca 0,2 mm konstantní a nárůst síly začíná až poté. Zatímco křivky z elektrického lisu jsou až na jednu výjimku (vysoký přesah) v prvním okně z hlediska sil v pořádku, několik křivek z hydraulického lisu kvůli pozdnímu nárůstu síly nedosáhne požadovaného minima v 1. kontrolním okně a stanice kusy označí jako zmetky.

Při průběhu 2. kontrolním oknem je sklon obou skupin křivek totožný, avšak hodnota síly je u žlutých křivek stále ovlivněna pozdním náběhem – je cca o 8 - 10 % maximální síly nižší než u křivek zelených. V 2. kontrolním okně jsou žluté křivky až na kusy s extrémně nízkým přesahem v pořádku. Problémem jsou zde křivky zelené představující kusy lisované na elektrickém lisu, které vypadávají na vysokou sílu (a to i kusy s běžně dosažitelnými přesahy).

Zřetelný rozdíl mezi oběma skupinami křivek představují i jejich koncové dráhy. V případě hydraulického lisu dochází k posunu koncové pozice lisu až o 0,55 mm. K ukončení lisování by mělo dojít v předepsaném rozsahu síly ($F_{\max} \pm 0,05F_{\max}$), při které by se již nemělo stát, že bude kulička nedolisována. U elektrického lisu se tento požadavek podařilo bez problémů splnit, u hydraulického lisu tak přesných hodnot dosaženo nebylo. K ukončení procesu dochází ve většině případů v ($F_{\max} \pm 0,05F_{\max}$), ale jsou zde i výjimky, u kterých proces skončil na 70, 80, 85 % F_{\max} , v jednom případě dokonce 35 % F_{\max} . U všech křivek došlo ke zlomu v nárůstu síly (i přesto byly kuličky vizuálně zkontrolovány) a k nedolisování během testů tedy nedošlo.

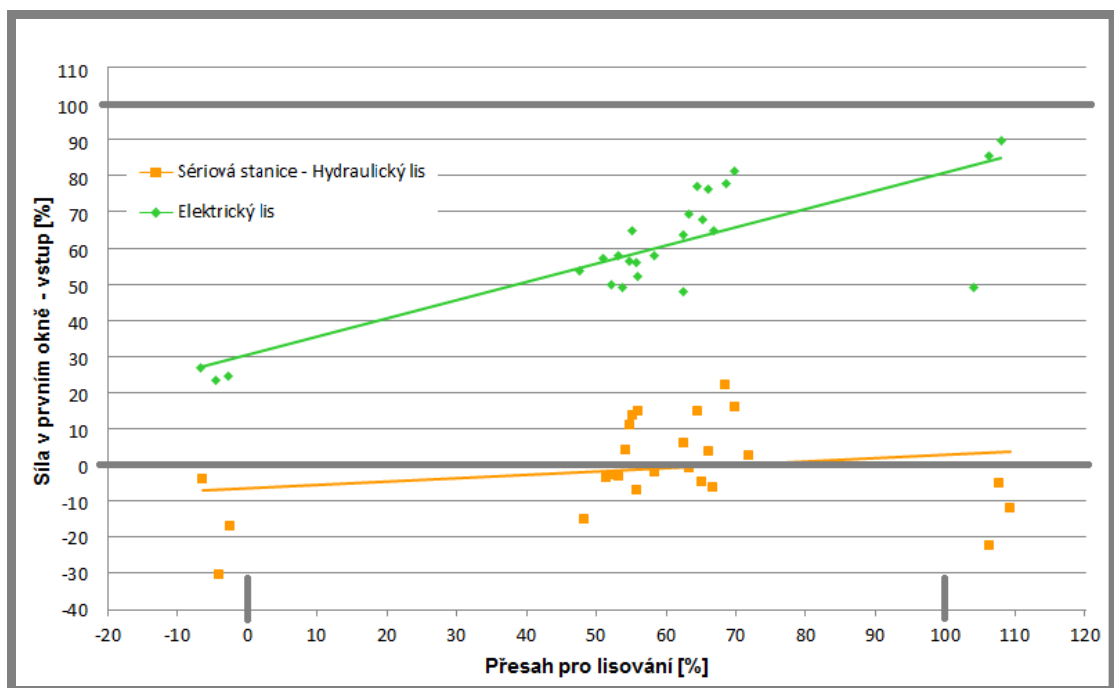
4.1.2 Vyhodnocení lisovacích sil v závislosti na přesahu pro lisování

Obrázky 4.2-4.5 představují závislost lisovací síly na velikosti přesahu. Každý graf má na svislé ose vyznačen povolený rozsah sil podle kontrolních oken, na vodorovné ose dosažitelné extrémní hodnoty přesahu.

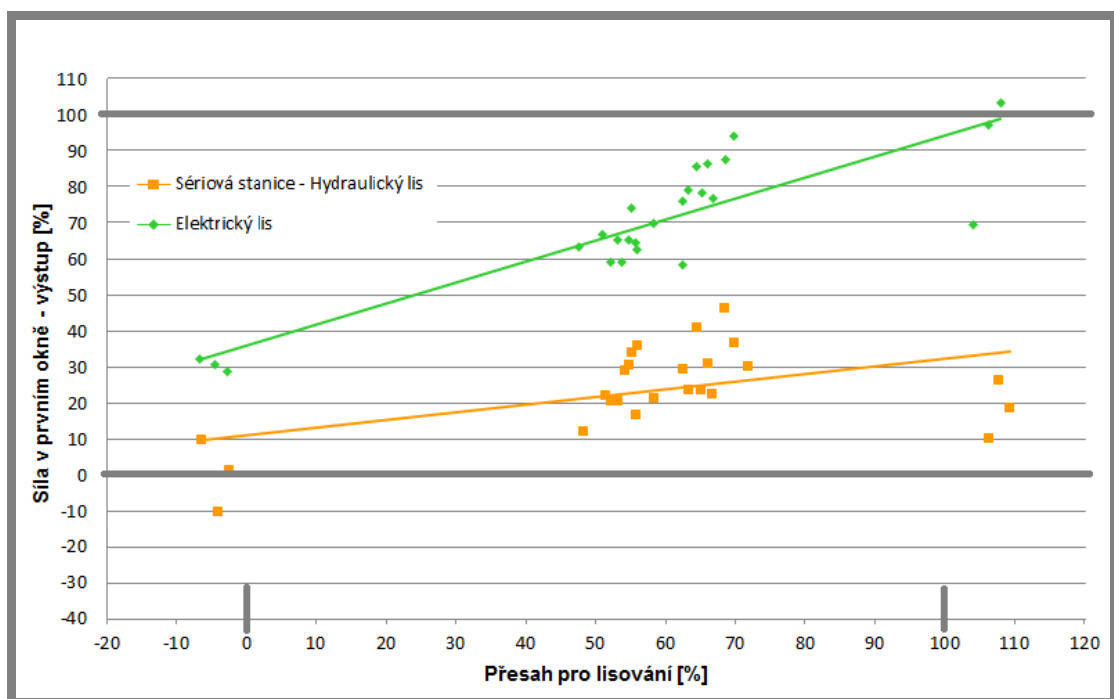
Ve všech případech síla se zvětšujícím se přesahem roste, lis musí překonávat větší odpor.

Při velmi malých silách u hydraulického lisu není tato závislost tolik patrná (Obr. 4.2 – žlutá přímka), protože hydraulický lis není dostatečně citlivý na zaznamenání změn při nízkých silách (5-10 % F_{\max}).

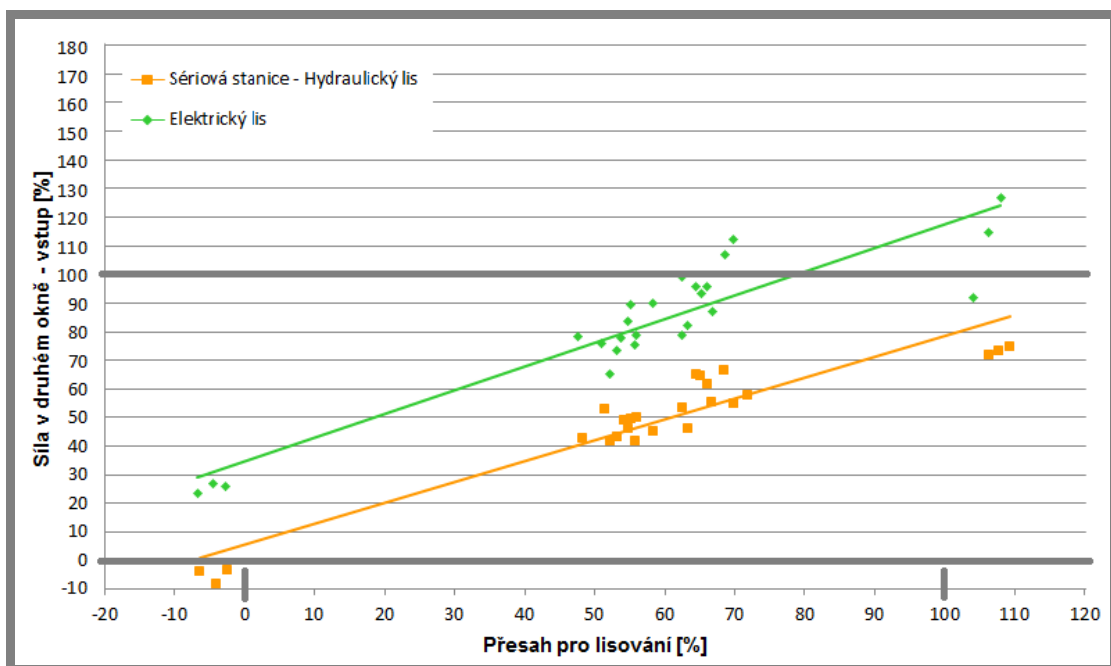
Při vyšetřování sil v 2. kontrolním okně (Obr. 4.4 a 4.5), je rostoucí závislost zřejmá již i z křivek získaných z hydraulické stanice, přičemž směrnice obou přímek jsou srovnatelné.



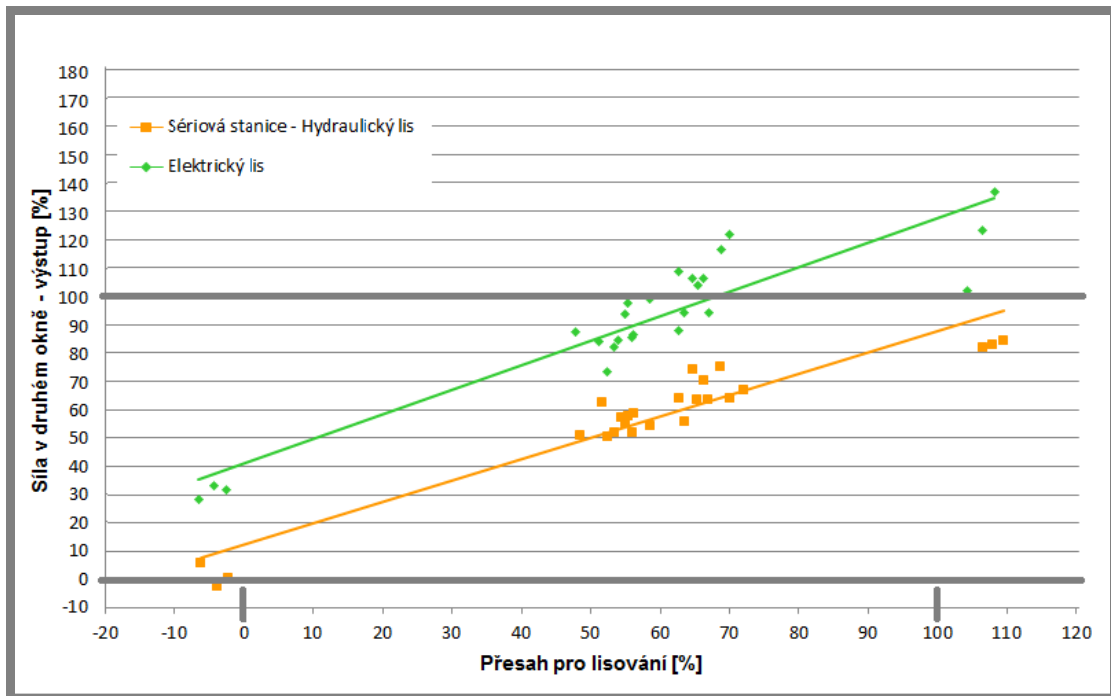
Obrázek 4.2 Síla v prvním okně – vstup, vodorovné šedé úsečky určují hraniční síly 1. kontrolního okna, svislé šedé úsečky určují hraniční přesahy



Obr. 4.3 Síla v prvním okně - výstup, vodorovné šedé úsečky určují hraniční síly 1. kontrolního okna, svislé šedé úsečky určují hraniční přesahy



Obr. 4.4 Síla v druhém okně - vstup, vodorovné šedé úsečky určují hraniční síly 2. kontrolního okna, svislé šedé úsečky určují hraniční přesahy

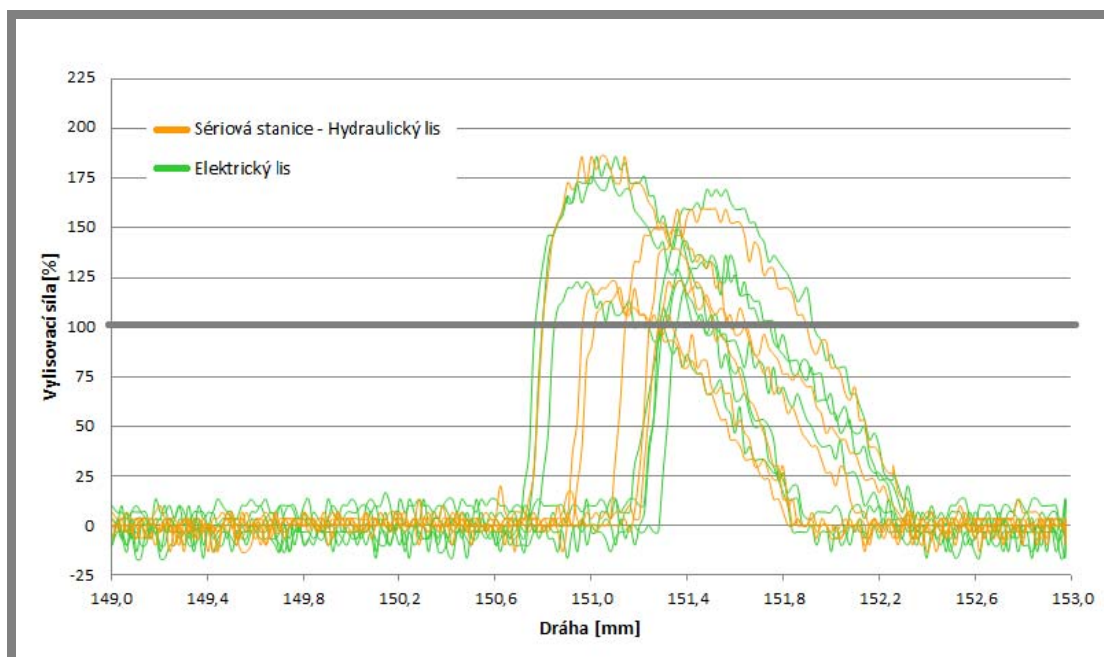


Obr. 4.5 Síla v druhém okně - výstup, vodorovné šedé úsečky určují hraniční síly 2. kontrolního okna, svislé šedé úsečky určují hraniční přesahy

4.1.3 Porovnání vylisovacích křivek a sil

4.1.3

Vylisovací test proběhl na elektrickém lisu rychlostí 0,4 mm/s.



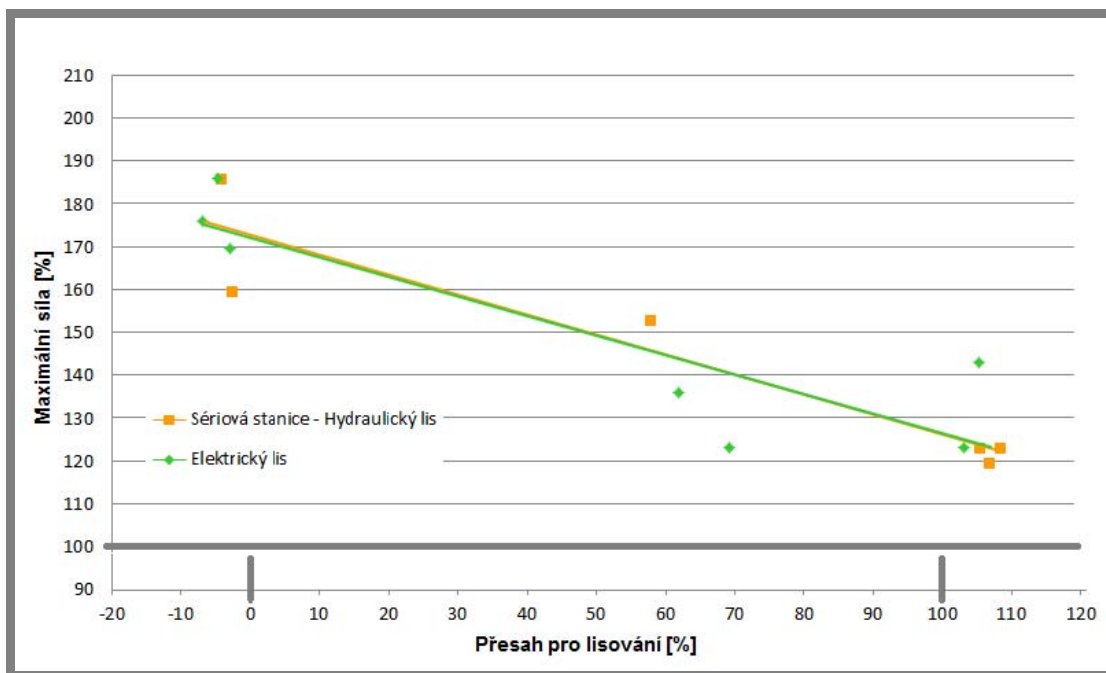
Obr. 4.6 Vylisovací křivky, síla 100 % odpovídá minimální hodnotě předepsané síly pro vylisování

Vylisovací křivky (Obr. 4.6) jsou vzájemně posunuty až o cca 0,6 mm, což způsobila nedostatečná přesnost při řezání vzorků – poloha řezu 1 ovlivňuje výšku zalisované kuličky nad podložkou, tzn. vzdálenost výchozí polohy trnu od kuličky. Odchylku (kulička je dál od trnu) může způsobovat také nedolisování kuličky (vyskytuje se pouze na hydraulickém lisu).

Kromě dráhy, na které křivky začínají růst, a maximální síly, které dosahují, se mohou vzájemně lišit ještě v délce. Délka indikuje, jak velkou dráhu lis urazil od prvního kontaktu lisovacího trnu s kuličkou do polohy, ve které kulička ztratila s otvorem kontakt a vypadla. Kratší křivky by znamenaly menší hloubky otvorů pro kuličku, křivku by případně opět ovlivnila (zkrátila) i nedolisovaná kulička. Délka všech křivek se pohybuje okolo 1 mm, vzájemné odchylky dosahovaly max. 10 %, což opět potvrzuje, že hloubka otvorů byla v mezích tolerance, o čemž už nás ostatně přesvědčily křivky lisovací (zanedbatelné odchylky v koncových pozicích jednotlivých křivek).

Co se týče výšky vylisovacích křivek, která je jako jediná kontrolována, bylo stanovené minimum překročeno u všech případů minimálně o 20 %.

Dosažená maxima jsou přehledněji znázorněna v následujícím grafu (Obr. 4.7). Maximální hodnota vylisovací síly s rostoucím přesahem (na rozdíl od závislosti lisovací síly na přesahu) klesá.



Obr. 4.7 Závislost maximální vylisovací síly na přesahu, síla 100 % odpovídá min. hodnotě předepsané síly pro vylisování, svislé šedé úsečky určují hraniční přesahy

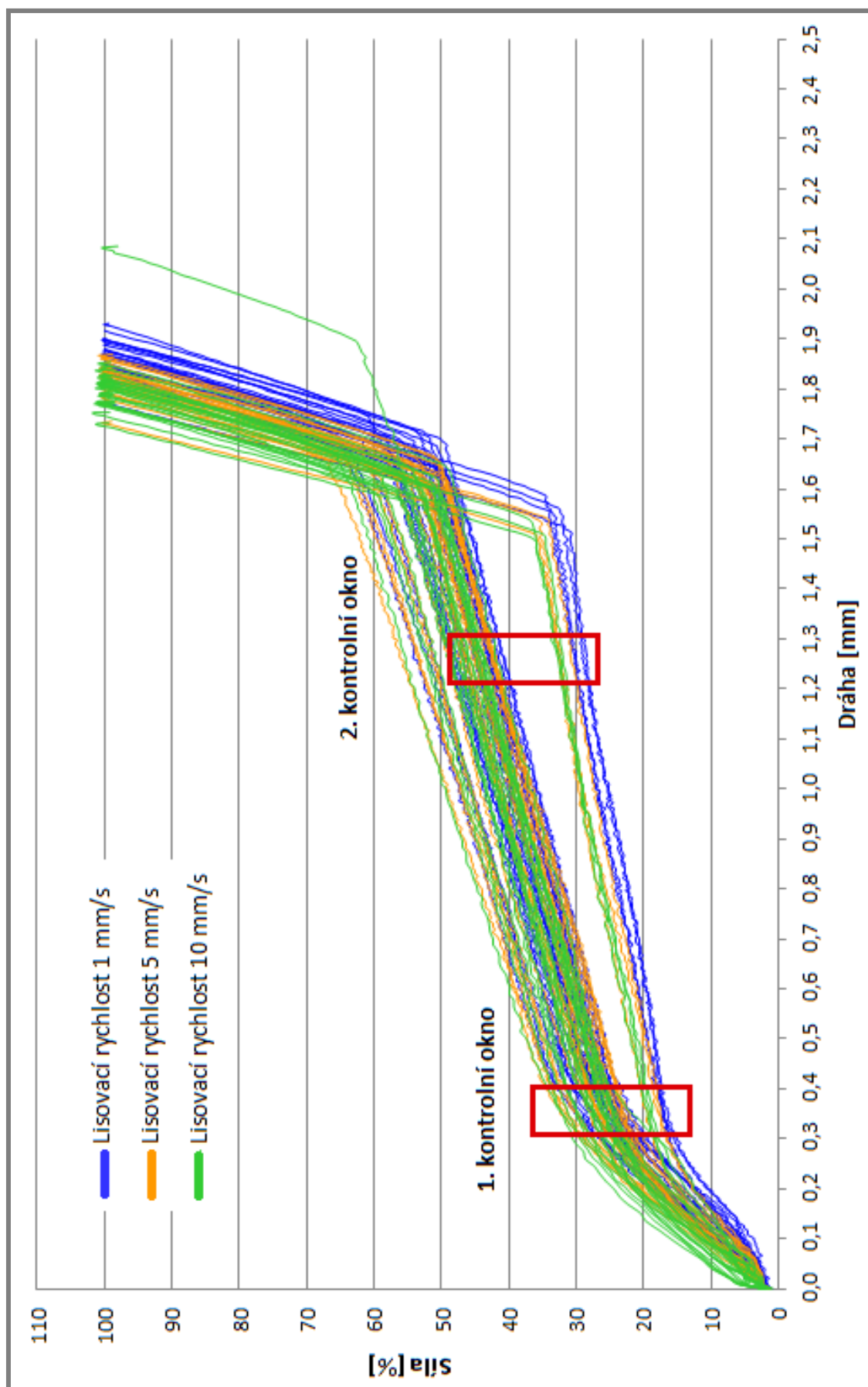
4.2 Test č. 2 – Porovnání lisovacích rychlostí

Test probíhal na elektrickém testovacím lisu na technickém oddělení. Zvoleny byly 3 různé rychlosti, pro každou rychlost byla určena jedna skupina dílců napárovaných podle přesahu, celkem 75 ks.

4.2.1 Porovnání lisovacích křivek

Lisovací křivky získané z lisování kuliček do těles třemi různými rychlostmi na elektrickém lisu (Obr. 4.8) nevykazují žádné zvláštní jevy. Určité rozvrstvení můžeme pozorovat u skupinky křivek reprezentující páry s malými přesahy – zde můžeme vidět jistou závislost síly na rychlosti – tedy větší hodnotu lisovací síly při větší lisovací rychlosti. Rozdíly jsou však nepatrné (cca 5 % F_{\max} mezi nejmenší a největší lisovací rychlostí). Pokud se zaměříme na křivky získané z lisování párů s běžnými nebo extrémně velkými přesahy, nelze zde pozorovat žádnou závislost.

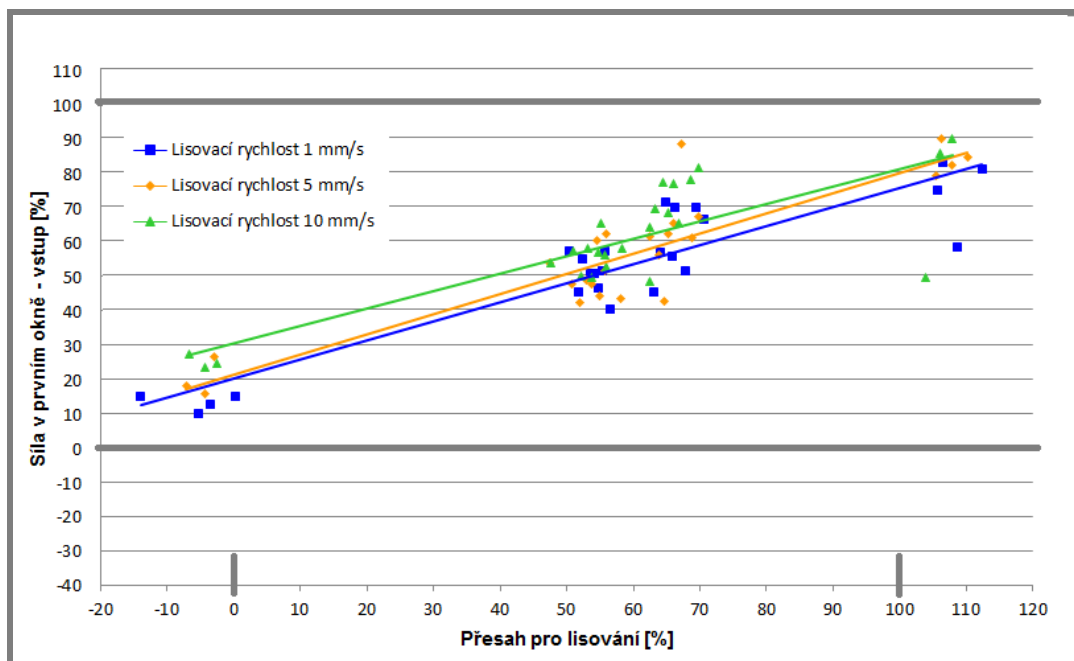
Stejně jako u křivek z elektrického lisu v případě testu č. 1 lze pozorovat vysokou sílu v 2. kontrolním okně, a to i u běžně se vyskytujících přesahů.



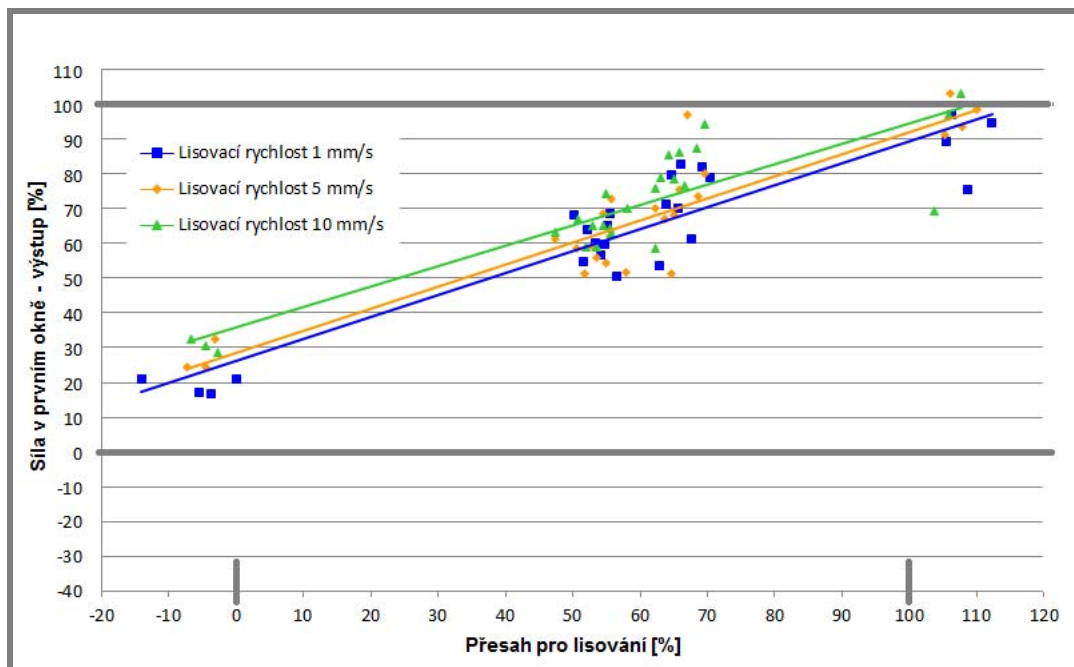
Obr. 4.8 Test č. 2 - Lisovací křivky

4.2.2 Vyhodnocení lisovacích sil v závislosti na přesahu pro lisování

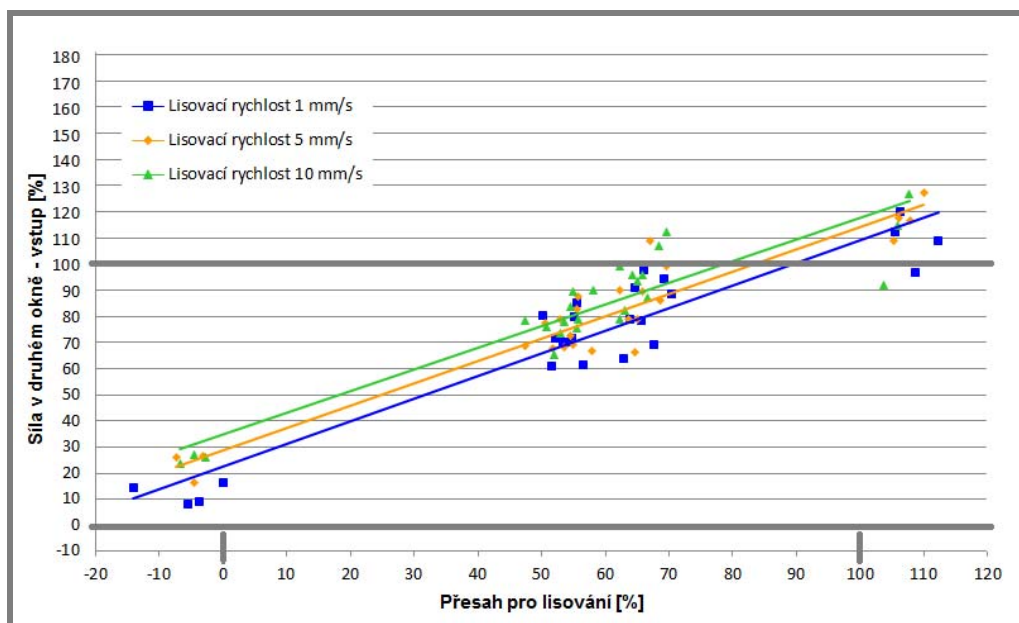
S rostoucím přesahem opět roste lisovací síla (Obr. 4.9-4.12). Všechny závislosti v jednotlivých oknech jsou srovnatelné, rozdíly mezi rychlostmi zanedbatelné.



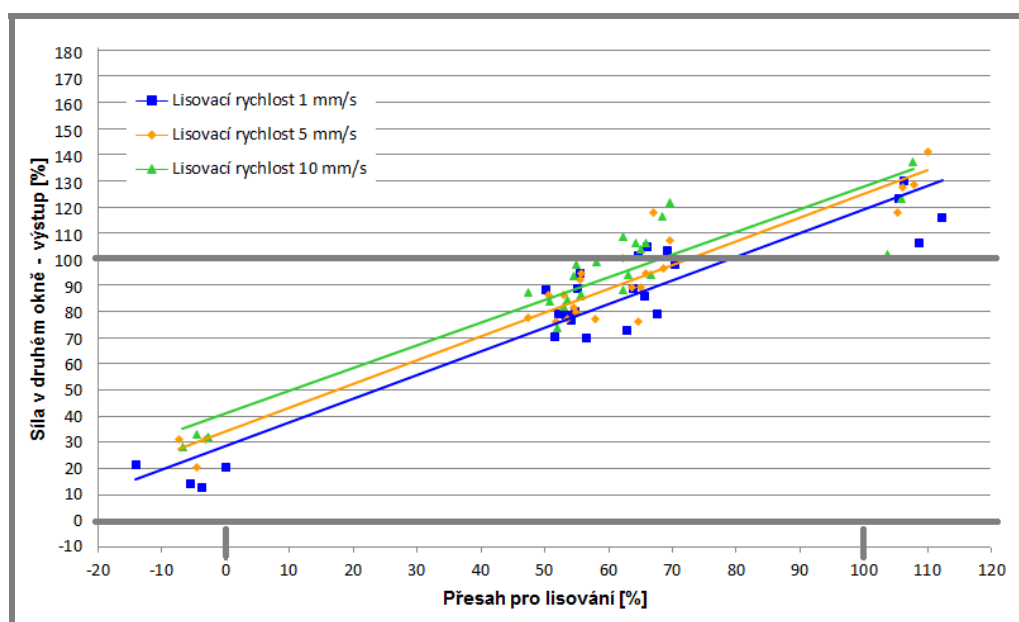
Obr. 4.9 Síla v prvním okně – vstup, vodorovné šedé úsečky určují hraniční síly 1. kontrolního okna, svislé šedé úsečky určují hraniční přesahy



Obr. 4.10 Síla v prvním okně – výstup, vodorovné šedé úsečky určují hraniční síly 1. kontrolního okna, svislé šedé úsečky určují hraniční přesahy



Obr. 4.11 Síla v druhém okně – vstup, vodorovné šedé úsečky určují hraniční síly 2. kontrolního okna, svislé šedé úsečky určují hraniční přesahy



Obr. 4.12 Síla v druhém okně – výstup, vodorovné šedé úsečky určují hraniční síly 2. kontrolního okna, svislé šedé úsečky určují hraniční přesahy

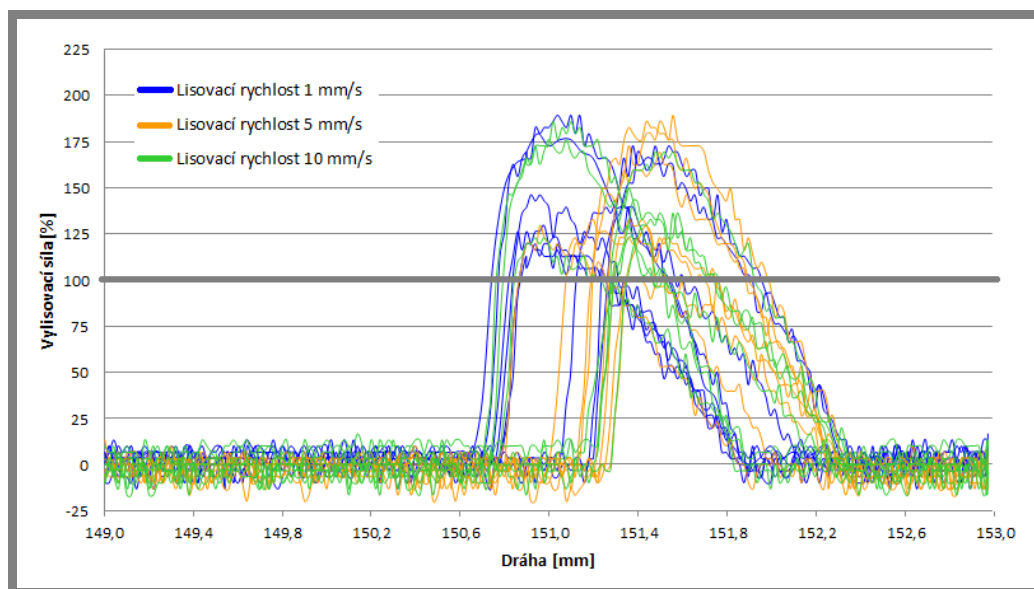
4.2.3 Porovnání vylišovacích křivek a sil

4.2.3

Vylišovací test proběhl na elektrickém lisu rychlostí 0,4 mm/s.

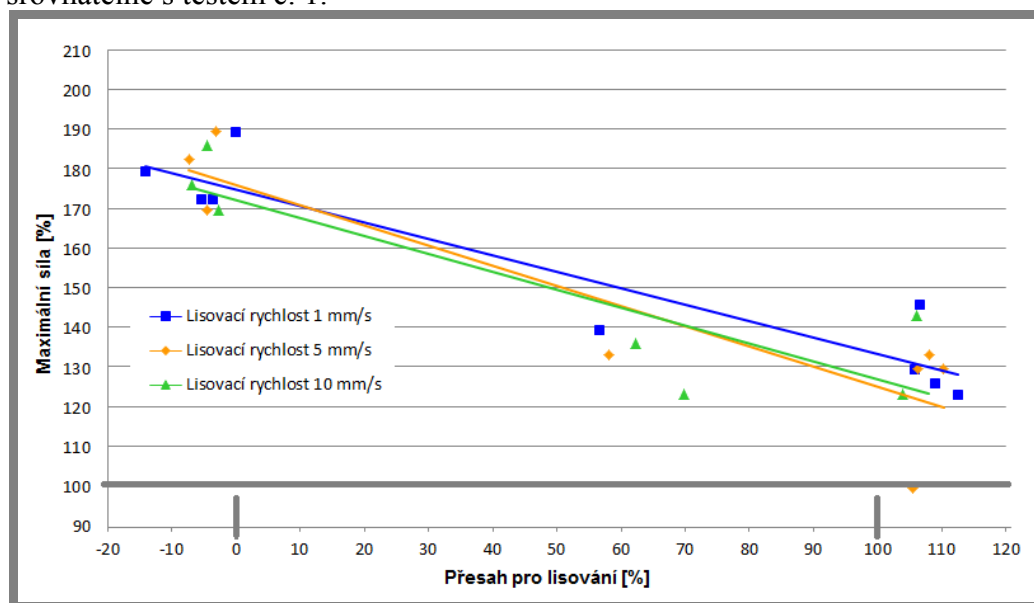
Vylišovací křivky (Obr. 4.13) jsou navzájem maximálně o cca 0,6 mm vzájemně posunuty kvůli nepřesnosti polohy řezné roviny 1. V testu č. 2 byly všechny kusy zalisovány pomocí elektrického lisu, vliv nedolisování kuličky na posun lisovacích křivek tedy můžeme vyloučit. Délky křivek se pohybují kolem 1 mm, vzájemné odchylky dosahovaly max. 10 %, což je v souladu s vzájemnými

odchytkami koncových pozic jednotlivých *lisovacích* křivek – hloubka otvorů byla v mezích tolerance.



Požadovaného minima bylo dosaženo až na jeden případ u všech kusů, výjimku tvoří těleso ze středu tolerančního pole, do kterého byla lisována kulička rychlostí 5 mm/s – maximální vylisovací síla však činí 99,5 % požadované síly a proměřené parametry tělesa vyhovují tolerancím (nebyly nalezeny žádné odchylky oproti ostatním kusům) – tato nevyhovující křivka může být v daném množství zanedbána.

Maximální hodnota vylisovací síly s rostoucím přesahem klesá stejně jako u předchozího testu (Obr. 4.14). Hodnoty sil v závislosti na přesazích jsou srovnatelné s testem č. 1.



4.3 Test č. 3 – Porovnání mazadel

4.3

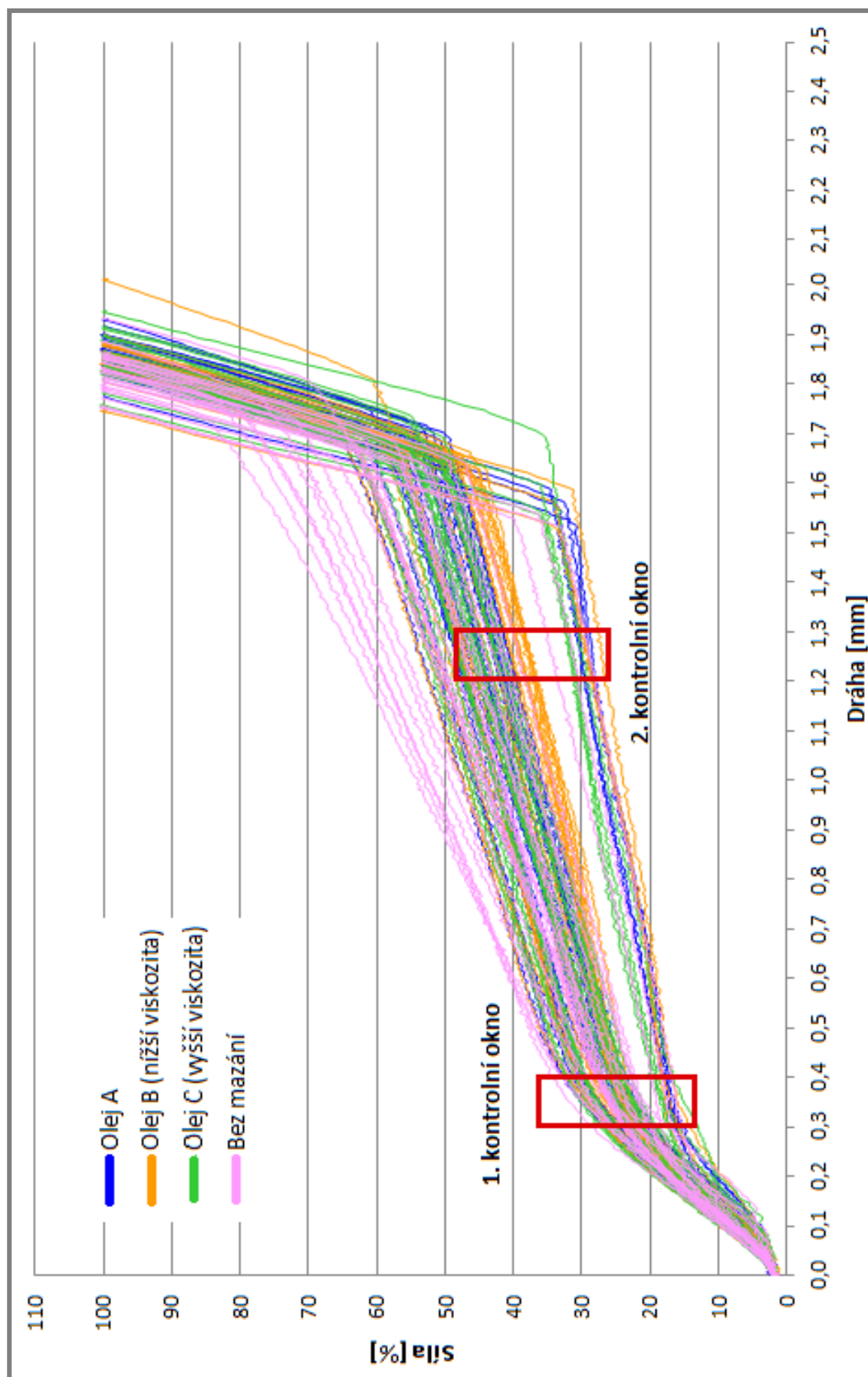
Test probíhal na elektrickém testovacím lisu na technickém oddělení. Zvoleny byly 3 různé oleje, pro každý olej byla určena jedna skupina dílců napárovaných podle přesahu. Čtvrtá skupina byla lisována bez mazadla. Celkem bylo použito 100 ks.

4.3.1 Porovnání lisovacích křivek

4.3.1

Rozvrstvení lisovacích křivek (Obr. 4.15) není nijak výrazné, závislost na použitém oleji je zanedbatelná. Největší vliv má přítomnost/nepřítomnost mazadla, použitý druh nehraje roli. V lisovacím předpisu je uvedena nutnost mazání otvoru před lisováním kuličky, což nám test potvrdil – u kusů lisovaných bez mazání vypadla většina na vysokou lisovací sílu v 2. okně.

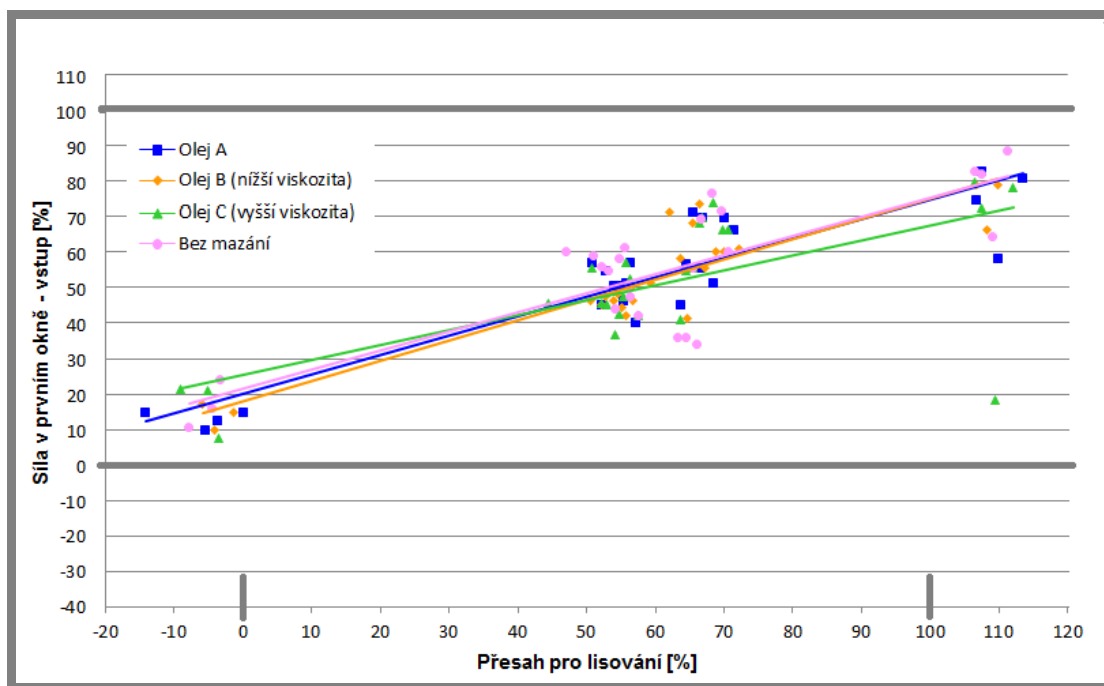
Naopak určitého snížení lisovací síly v druhém kontrolním okně oproti lisování se sériovým olejem bylo dosaženo mazáním olejem s nižší viskozitou. Vysoce kvalitní olej o velké viskozitě neměl téměř žádný vliv na velikost síly, nemá tedy cenu používat kvalitní mazadla, stačí, aby lisování neprobíhalo nasucho.



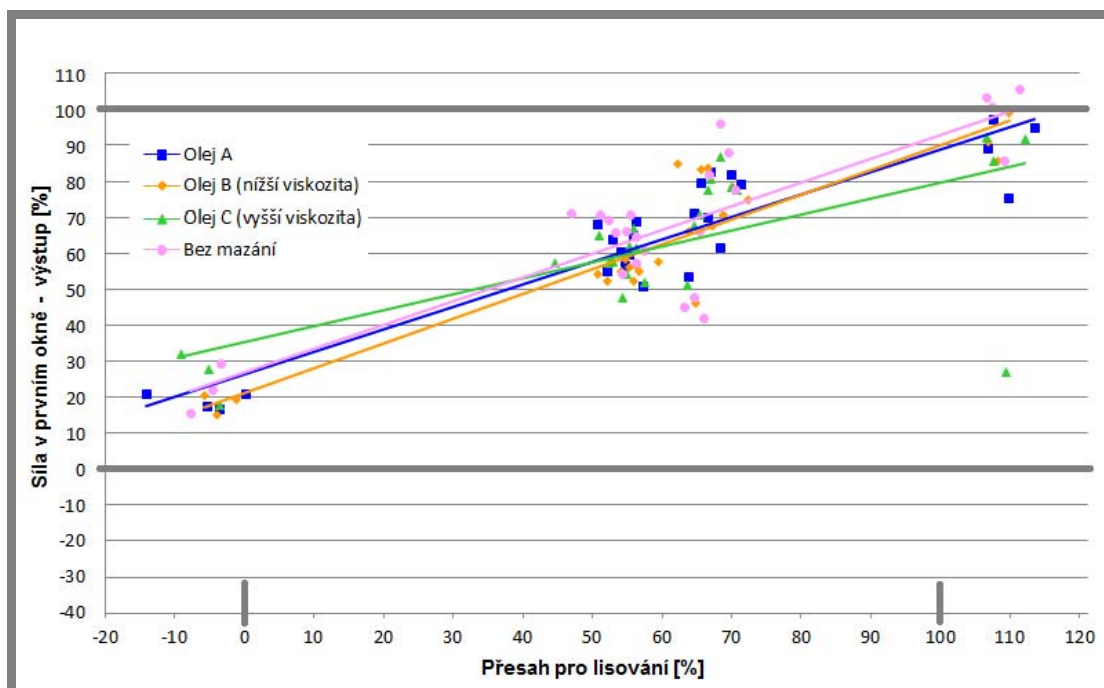
Obr. 4.15 Test č. 3 - Lisovací křivky

4.3.2 Vyhodnocení lisovacích sil v závislosti na přesahu pro lisování

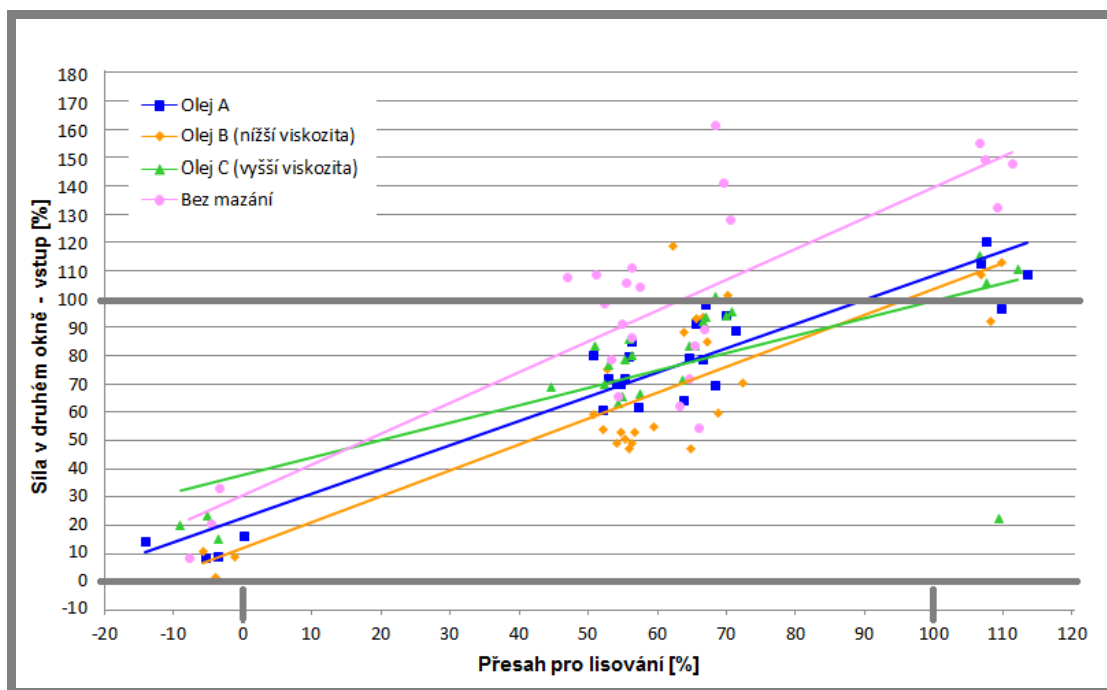
S rostoucím přesahem roste lisovací síla (Obr. 4.16-4.19). Změna sil napříč jednotlivými mazadly je zanedbatelná. Nárůst sil byl zaznamenán v případě lisování bez použití mazadla a to zejména v 2. kontrolním okně (při vyšších silách).



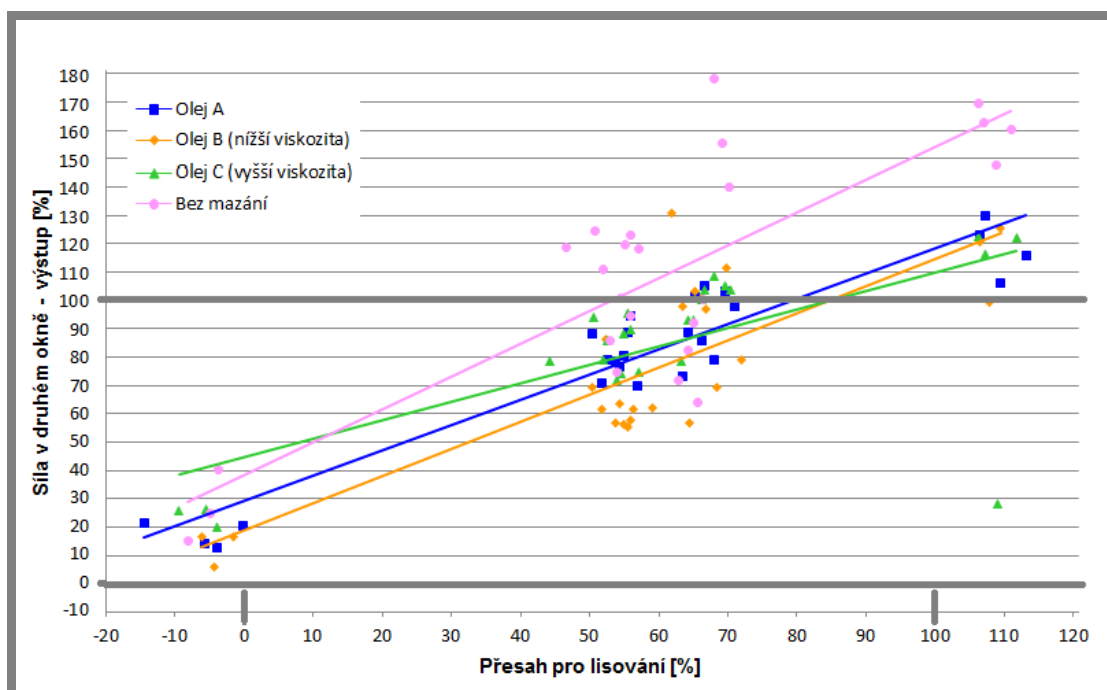
Obr. 4.16 Síla v prvním okně – vstup, vodorovné šedé úsečky určují hraniční síly 1. kontrolního okna, svislé šedé úsečky určují hraniční přesahy



Obr. 4.17 Síla v prvním okně – výstup, vodorovné šedé úsečky určují hraniční síly 1. kontrolního okna, svislé šedé úsečky určují hraniční přesahy



Obr. 4.18 Síla v druhém okně – vstup, vodorovné šedé úsečky určují hraniční síly 2. kontrolního okna, svislé šedé úsečky určují hraniční přesahy



Obr. 4.19 Síla v druhém okně – výstup, vodorovné šedé úsečky určují hraniční síly 1. kontrolního okna, svislé šedé úsečky určují hraniční přesahy

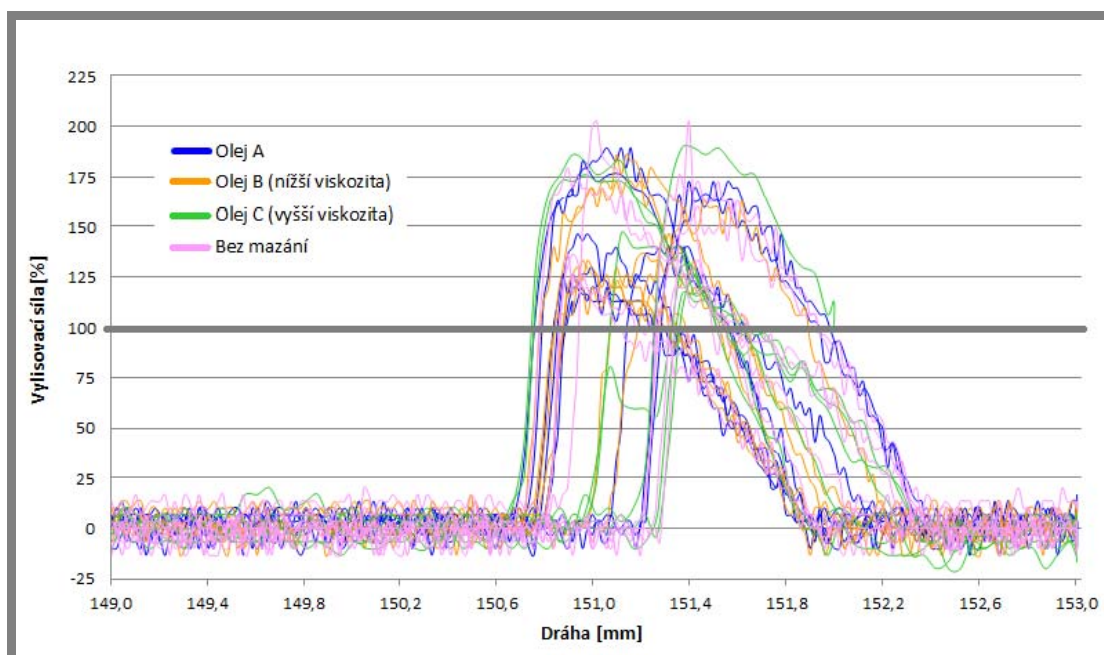
4.3.3 Porovnání vylisovacích křivek a sil

Vylisovací test proběhl na elektrickém lisu rychlostí 0,4 mm/s.

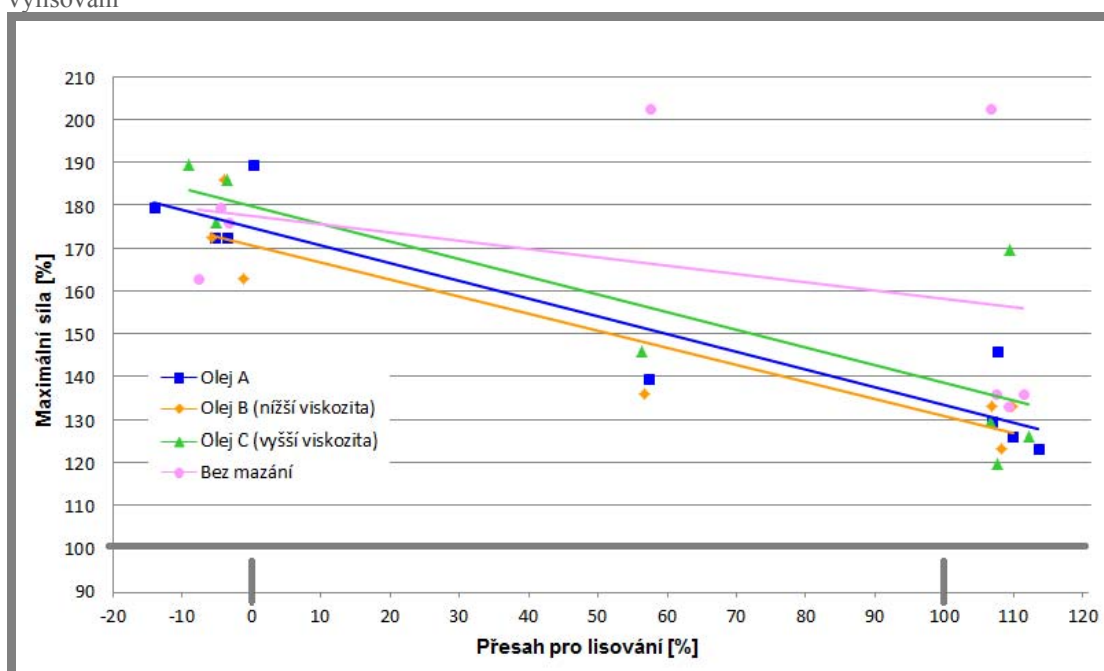
Vylisovací křivky (Obr. 4.20) jsou opět až o cca 0,6 mm vzájemně posunuty kvůli nepřesnosti polohy řezné roviny 1, k nedolísování kuličky nemohlo dojít, test č. 3 probíhal celý na elektrickém lisu.

Délky křivek se pohybují kolem 1 mm, vzájemné odchylky dosahovaly max. 10 %, což je v souladu s vzájemnými odchylkami koncových pozic jednotlivých lisovacích křivek – hloubka otvorů byla v mezích tolerance.

Požadovaného minima bylo dosaženo u všech kusů.



Obr. 4.20 Vylisovací křivky, síla 100 % odpovídá minimální hodnotě předepsané síly pro vylisování



Obr. 4.21 Závislost maximální vylisovací síly na přesahu

Maximální hodnota vylisovací síly s rostoucím přesahem klesá (Obr. 4.21) stejně jako u předchozích testů. Hodnoty sil v závislosti na přesazích jsou víceméně srovnatelné s testem č. 1 a 2, významně vyšších hodnot dosahují pouze některé křivky získané vylisováním nemazaných kuliček.

4.4 Výpočet lisovací síly v závislosti na přesahu pro lisování a vylisovací síly

Při výpočtu lisovací síly budu vycházet ze vztahu pro potřebnou sílu k nalisování jednoho válcového tělesa na druhé (Obr. 4.22).

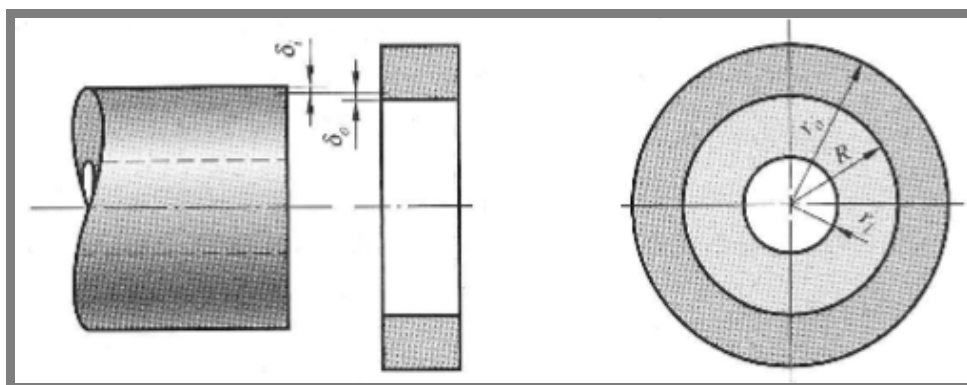
$$F = \pi \cdot 2 \cdot R \cdot L \cdot p \cdot f,$$

R [mm] – společný poloměr součástí po montáži

L [mm] – délka spoje

p [MPa] – tlak ve stykové ploše

f - součinitel tření [2]



Obr. 4.22 Schéma spojení hřídele a náboje nalisováním, vlevo: před montáží, vpravo: po montáží [12]

Při výpočtu tlaku vycházím z toho, že celková deformace součástí odpovídá součtu deformací vnitřního a vnějšího členu vzhledem k jejich poloměrům a také se rovná přesahu mezi součástmi (vztahovanému opět k poloměru).

$$\delta = |\delta_o| + |\delta_i|$$

$$\delta = \frac{pR}{E_o} \left(\frac{r_o^2 + R^2}{r_o^2 - R^2} + \mu_o \right) + \frac{pR}{E_i} \left(\frac{R^2 + r_i^2}{R^2 - r_i^2} - \mu_i \right)$$

Obě součásti jsou ze stejného materiálu, platí: $E_o = E_i = E, \mu_o = \mu_i = \mu$

Vztah upravím:

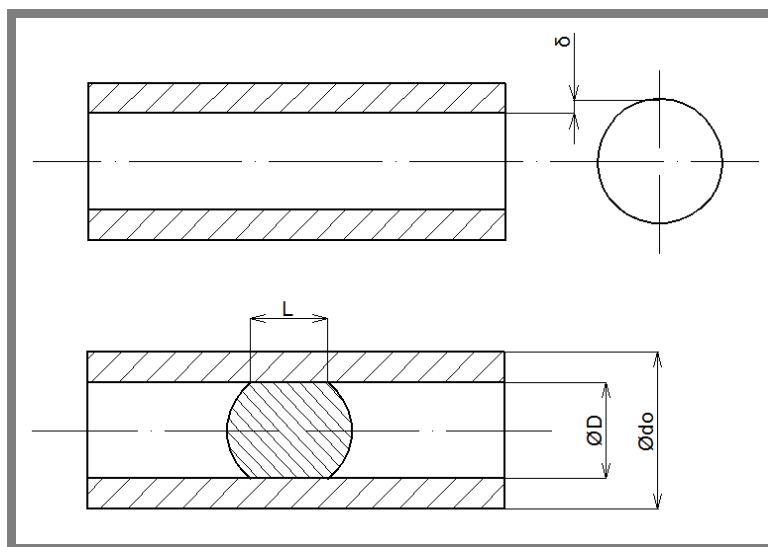
$$\delta = \frac{pR}{E} \left(\frac{r_o^2 + R^2}{r_o^2 - R^2} + \frac{R^2 + r_i^2}{R^2 - r_i^2} \right) = \frac{pR}{E} \left(\frac{2R^2(r_o^2 - r_i^2)}{(r_o^2 - R^2)(R^2 - r_i^2)} \right)$$

Vyjádřím tlak p :

$$p = \frac{\delta E}{R} \left(\frac{(r_o^2 - R^2)(R^2 - r_i^2)}{2R^2(r_o^2 - r_i^2)} \right)$$

V našem případě (Obr. 4.24) není vnitřní člen dutý ($r_i = 0$), vztah pro tlak potom bude:

$$p = \frac{\delta E}{R} \left(\frac{(r_o^2 - R^2)R^2}{2R^2 r_o^2} \right) = \frac{\delta E}{2R} \left(\frac{r_o^2 - R^2}{r_o^2} \right)$$



Obr. 4.23 Schéma zalisované kuličky v otvoru

Po dosazení konkrétních hodnot vypočítáme hodnotu tlaku pro případ maximálního přesahu podle výkresu:

$$\delta = \delta_{max} = 0,072\ 35\ mm$$

$$E = 210\ 000\ MPa$$

$$R = 1,125\ mm$$

$$r_o = 2,125\ mm$$

$$p = \frac{\delta E}{2R} \left(\frac{r_o^2 - R^2}{r_o^2} \right) = \frac{0,07235 \cdot 210000}{2 \cdot 1,125} \frac{2,125^2 - 1,125^2}{2,125^2} \approx 4860\ MPa$$

A následně lisovací sílu pro případ maximálního přesahu:

Statický součinitel tření za pro ocel-ocel s mastným povrchem $f = 0,1$ [15].

$L = 0,82\ mm$ – délka spoje byla spočítána z předpokladu, že při montáži dochází pouze k deformaci kuličky a to tak, že je kulička v nejširší oblasti stlačena do tvaru válce o stejném průměru, jako má otvor.

$$F = \pi \cdot 2 \cdot R \cdot L \cdot p \cdot f = \pi \cdot 2 \cdot 1,125 \cdot 0,82 \cdot 4860 \cdot 0,1 \approx 2816\ N$$

Stejný výpočet provedu pro případ minimálního přesahu dosažitelného z limitních hodnot ve výkresové dokumentaci:

$$\delta = \delta_{\min} = 0,033\ 65\ mm$$

$$R = 1,15\ mm$$

$$L = 0,56\ mm$$

hodnoty E , r_o a f zůstávají stejné

$$p = \frac{\delta E}{2R} \left(\frac{r_o^2}{r_o^2} - R^2 \right) = \frac{0,03365 \cdot 210000}{2 \cdot 1,15} \frac{2,125^2 - 1,15^2}{2,125^2} = 2172\ MPa$$

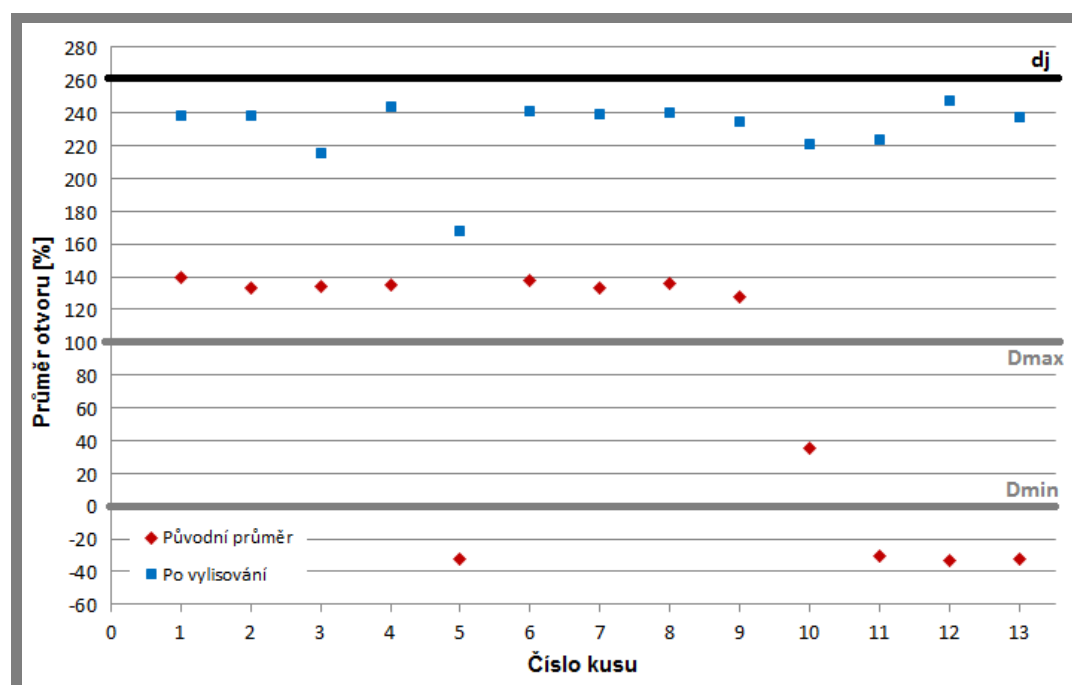
$$F = \pi \cdot 2 \cdot R \cdot L \cdot p \cdot f = \pi \cdot 2 \cdot 1,15 \cdot 0,56 \cdot 2172 \cdot 0,1 \approx 879\ N$$

[2][12][16]

Výpočet vylisovací síly:

Průměr otvoru po zalisování není znám a nebylo ho možné změřit. Ve výpočtu vylisovací síly tedy přistoupím k dalšímu zkrácení tím, že použiji hodnotu průměru otvoru po odstranění kuličky, který je jistě větší, než po jejím zalisování, neboť byl průchodem této kuličky deformován dvakrát.

Otvory po vylisování byly proměřeny u vybraných kusů, výsledky jsou znázorněny v následujícím grafu (Obr. 4.24).



Obr. 4.24 Srovnání otvorů před a po vylisování kuliček, hranice 0 a 100 % představují toleranční pole pro otvor podle výkresu, černá přímka znázorňuje jmenovitý průměr kuličky

U malých otvorů (pod hranicí tol. pole) došlo ke zvětšení o 5,9 % původního průměru, u velkých otvorů (nad hranicí tol. pole) ke zvětšení o 2,2 % jejich původního průměru.

Pokud by výsledky byly vztaženy k jmenovitému průměru kuličky (d_j) jako 100% hodnotě, aby bylo znázorněno, jak moc se průměr otvoru kuličky přizpůsobil, původní průměr malého otvoru představuje 93,9 %, velký otvor 97,3 % d_j . Průměr všech otvorů po vylisování dosahuje cca 99,5 % d_j .

S uvažováním měřeného konečného zdeformovaného průměru otvoru a kuličky, jejíž předchozí deformace je 100% elastická a přizpůsobí se tak rozšíření otvoru, vypočítám vylisovací sílu pomocí stejných vtažů jako v případě síly lisovací:

$$\delta = 0,0065 \text{ mm}$$

$$R = 1,184 \text{ mm}$$

$$L = 0,25 \text{ mm}$$

hodnoty E , r_o a f zůstávají stejné

$$p = \frac{\delta E}{2R} \left(\frac{r_o^2 - R^2}{r_o^2} \right) = \frac{0,0065 \cdot 210000}{2 \cdot 1,184} \frac{2,125^2 - 1,184^2}{2,125^2} = 397 \text{ MPa}$$

$$F = \pi \cdot 2 \cdot R \cdot L \cdot p \cdot f = \pi \cdot 2 \cdot 1,184 \cdot 0,25 \cdot 397 \cdot 0,1 \approx 74 \text{ N}$$

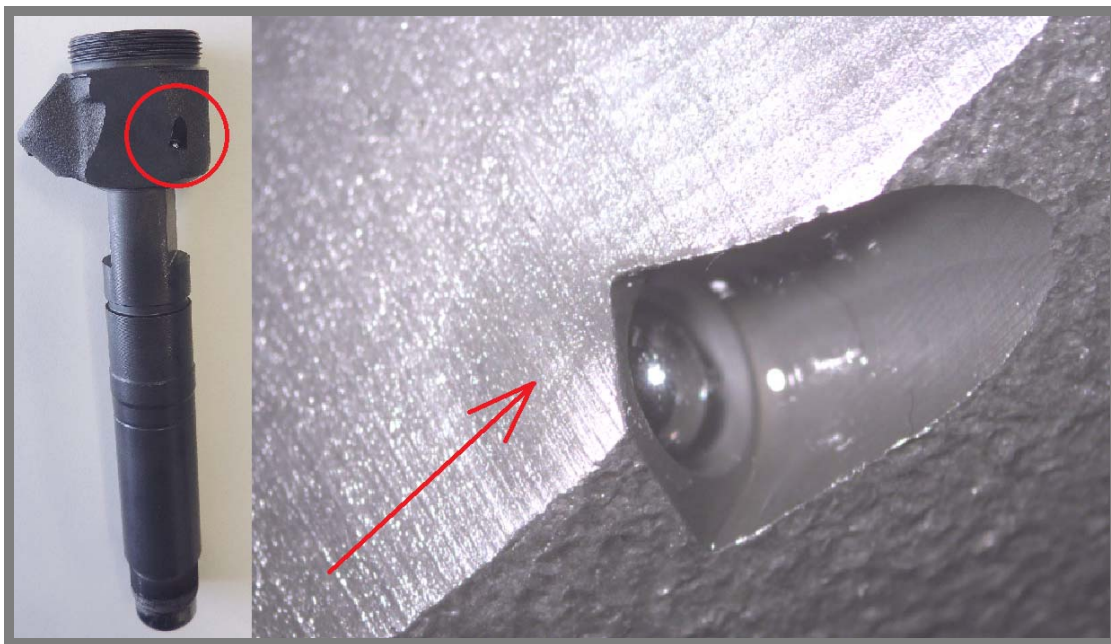
5 DISKUZE

Provedené testy potvrdily, že lisovací síla je nezávislá na rychlosti, kterou je součást lisována do otvoru (test 2). Dále pomohly odhalit, že v tomto konkrétním případě lisování kuličky do otvoru v tělese vstřikovače nemají kvůli vysokému přesahu na průběh lisovacích křivek vliv ani mazadla o různé viskozitě (test 3). Proměřením všech sériových vzorků nebyly zjištěny žádné chyby ve výrobě zkoumaných otvorů. Odchylky v měřených parametrech, které byly až na úhel náběhové hrany otvoru v mezích tolerance, neměly vliv na průběh lisování. Podrobně byla zkoumána tělesa, u kterých byla během počátečního proměření zjištěna významná odchylka. Šlo především o úhel náběhové hrany otvoru. Ani výsledky lisování kusů s nevyhovujícím úhlem náběhové hrany nebyly nijak odlišné od výsledků lisování těles s otvorem podle výkresu.

Viditelné rozdíly přinesl test č. 1 - porovnání lisování na elektrickém a hydraulickém lisu. Průběh křivek se liší na první pohled v *počátečním nárůstu síly* do prvního okna a v *délce*. Zpoždění náběhu křivek z hydraulického lisu o 0,2 mm je způsobeno upínacím přípravkem hydraulického lisu a možným nepatrným posunem uloženého tělesa v přípravku během lisování. Bohužel nebylo možné použít pro oba lisy stejného upínacího přípravku, lisovací podmínky tak nebyly totožné. Další příčinou by mohla být nesouosost otvoru s trnem lisu po upnutí tělesa. Ve stanici je teoreticky možno lisovat 2 kusy zároveň, vzhledem k malé vytíženosti stanice se ale jedno lisovací místo nepoužívá. Po provedení testů a bližšího zkoumání rozdílu v místě nárůstu křivek oproti lisování na el. lisu bylo přistoupeno k nahrazení levého přípravku pravým – toto mělo dopad na lisovací křivky (zpoždění bylo menší). Při výměně přípravků se také kontrolovala souosost lisovacího trnu a otvoru po uložení vstřikovače do přípravku. Bylo zjištěno, že ta nebyla při lisování ideální. Avšak ani tyto úpravy nevedly k zásadnímu zlepšení výpadkovosti stanice. Co se týče *délky* křivek, jedná se v konečné pozici o rozdíl až 0,65 mm. Je nemožné, aby vzájemný posun žlutých a zelených křivek způsobily různé hloubky otvorů, neboť u proměřených těles nebyly v těchto hloubkách zásadní rozdíly. Příčinou je zčásti již zmíněné zpoždění nárůstu žlutých křivek a problémy s upevněním tělesa v přípravku, zčásti nedostatečná přesnost v odečítání hodnot dráhy stanic, případně prohnutí rámu v průběhu lisování. Elektrický lis dosahuje drah kolem 1,7 mm, což odpovídá délkám otvorů.

Výsledky vylisovacích testů byly v pořádku, požadované síly dosáhly až na jeden vzorek všechny lisované kusy. Bylo zjištěno, že s rostoucím přesahem se vylisovací síla snižuje, avšak i extrémně vysoké přesahy, které se do výroby běžně nedostanou, stále dosahovaly hodnoty předepsané síly. Snížení síly způsobuje plastická deformace stěny - materiál je kuličkou při zalisování strháván a stlačován. Po zalisování kuličky se stěna nevrátí do původní polohy a „neuzamkne“ kuličku uvnitř, ale zůstane zdeformovaná. Zpětné vylisování kuličky pak vyžaduje daleko nižších sil než lisování.

Deformace je patrná pouhým okem na zalisovaných kusech – dochází k vyboulení stěny otvoru v místě zalisované kuličky (Obr. 5.1). Jedná se přibližně o 0,1 mm v nejvyšším bodě vzhledem k původní nedeformované ploše.



Obr. 5.1 Detail otvoru s kuličkou a deformace stěny po zalisování kuličky

Pokud vztáhneme změnu průměru otvoru po vylisování kuličky k jmenovitému průměru kuličky d_J (100 %), zvětšil se z 95,3 % d_J na 99,5% d_J .

Při výpočtu lisovací síly bylo z důvodu komplikovanosti úlohy přistoupeno k velkému zjednodušení. Vztah pro lisování kuličky do válcového otvoru byl získán ze vztahu pro vzájemné nalisování dvou válcových součástí do sebe. Kulička má do válcového tělesa daleko, rozměr styčných ploch je velmi malý a došlo ke zkreslení výsledků. Ani válcové těleso, které představovalo otvor, není v reálu válcovým tělesem, jelikož tloušťka stěny kanálku není konstantní a pohybuje se od 0,5 mm (směrem k vnější části vstřikovače) do cca 1,5 mm (směrem ke středu vstřikovače). Použité vztahy jsou odvozeny pro oblast elastických deformací. V úloze řešené v této práci však docházelo i k deformaci plastické. Jelikož nebyl znám společný průměr, na který se součásti zdeformují, uvažovala jsem pro jednoduchost pouze deformaci kuličky při neměnném průměru otvoru. Síla pro lisování s největšími přesahy vyšla přibližně 2,2 kN, což představuje asi 45% podíl maximální lisovací síly stanovené v předpise. Pokud tuto sílu porovnáme s křivkami získanými lisováním, bylo by sotva možné bezpečně zalisovat kusy s přesahy nejmenšími. Vypočítaná síla umožňující lisování kusů s minimálními přesahy by pak nestačila ani na dosažení 1. kontrolního okna, vypočtená hodnota byla 18 % F_{\max} .

K dalším zjednodušením bylo přistoupeno při výpočtu vylisovací síly. Vypočítaná hodnota pak činí 37 % z předepsaného minima.

Není možné posoudit, k jak velkému zkreslení došlo, jelikož není známo, za jakých okolností byly stanoveny síly v předpise, výpočty stojící za těmito hodnotami nebylo ve firmě možné dohledat a je dokonce možné, že byly zjištěny experimentálně nebo na základě předchozích zkušeností s lisováním kuliček do těles čerpadel.

Důkladnější prozkoumání problému by přineslo řešení pomocí MKP. Vzhledem k tomu, že řešenou problematikou práce je především výpadkovost stanice, a ne správnost lisovacího předpisu či přesahu pro lisování, modelace problému v MKP by přesahovala rámec této práce.

Jak už bylo zmíněno, zkoumaný vstřikovač spadá do nejstarší generace vstřikovačů systému Common Rail. Pozdějších generací se problematika zalisování netýká. Je tedy otázkou, zda má smysl zabývat se podrobně fungujícím a těsnícím spojem, když se jedná o nepatrnou část mnohem složitějšího (a spoustu závažnějších problémů přinášejícího) Common Rail systému, na jehož vývoji a zlepšování se stále pracuje.

Výpadkovost stanice je způsobena pozdním a pozvolnějším nárůstem síly před 1. kontrolním oknem. Stanice není používána denně, výroba typu vstřikovačů, které vyžadují zaslepení kanálku, probíhá nárazově několikrát do měsíce. S každou dodávkou tohoto typu těles není jisté, jakého procenta budou výpadky dosahovat. Jedinou možností regulace křivek a tím i výpadků (po prověření nevýznamného vlivu lisovacích rychlostí a mazadel na průběh křivek) představuje pouze změna spouštěcí síly, jejíž hodnota není v předpise nijak definována. Po zvýšení hodnoty této spouštěcí síly dojde k posunu křivek k vyšším hodnotám, přičemž obě kontrolní okna zůstávají pevně na místě. Výpadky se tímto způsobem dají snížit na přípustnou hodnotu. Toto řešení lze však sotva považovat za ideální.

Vzhledem k nepředvídatelnosti chování stroje a špatnému stavu upínacího přípravku, který zcela nezabraňuje pohybu upnutého vstřikovače při lisování, nemá v tomto případě smysl změna lisovacího předpisu – tedy posun kontrolních oken. Pokud by se mělo přistoupit ke změnám v předpise, bylo by to kvůli výměně stávajícího hydraulického lisu za elektrický. Křivky z elektrického lisu procházejí 1. kontrolním oknem bez problémů, kusy však vypadávají na vysokou sílu v 2. okně. Změna procesního předpisu by tedy minimálně zahrnovala posunutí 2. kontrolního okna o cca 8 % F_{\max} výš.

V rámci závodu má výrobní oddělení možnost odkoupit použitý elektrický lis. Po vyčíslení ztrát spojených s výpadky od ledna 2017 bylo zjištěno, že tyto ztráty již přesáhly nákupní cenu zmíněného lisu.

Lisováním pomocí elektrického lisu lze dosahovat stabilnějších hodnot (všechny křivky získané z elektrických lisů se liší minimálně, lisování na el. lisu umožňuje opakovatelnost výsledků, pomocí volitelné rychlosti lze dosahovat kratších lisovacích časů (lze rozdělit pohyb lisovací hlavy na sjíždění do startovací pozice a samotné lisování).

V problematice zaslepování otvorů představují kuličky velmi jednoduché řešení, oproti ostatním typům zátek na trhu. Pro jejich instalaci není potřeba speciálního přípravku a není nutné je před montáží orientovat. Na počátku však nestály složité výpočty nebo modelování problému, ale pouze série experimentů, kdy byla kulička zalisována a poté byl proveden funkční test. Spoj dosáhl dostatečné těsnosti a odolnosti při dlouhodobých testech, byl tedy přijat jako možné řešení. Při sběru informací v rámci firmy nebylo možné dohledat dokumenty o zavádění ložiskových kuliček do výroby. Jedná se ale o problematiku starou řadu let, původní vývoj pravděpodobně probíhal v německém závodě, kuličky se dodnes ve výrobě používají a fungují.

Výměna kuličky např. za Lee zátku, která se ve firmě také používá pro zaslepování kanálků vysokotlakých čerpadel, by s sebou nesla změnu postupu vrtání otvoru v tělese, který by se musel přizpůsobit rozměrům zátky. Po zvážení všech nutných změn a přihlédnutí k tomu, že stávající řešení nevede k funkčním problémům, problémům s těsností spoje či prasklinám, lze dojít k závěru, že zaslepení pomocí kuličky je pro daný případ plně dostačující.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ROMANOVSKIJ, V.P. *Příručka pro lisování za studena*. Praha: SNTL, 1959, 537 s.
- [2] TRUTNA, Pavel. *Zařízení pro zalisování tlumiče průtoku do tělesa vstřikovacího čerpadla*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2010.
- [3] MITCalc - Strojírenské, průmyslové a technické výpočty, 2003 [online]. Poslední změna 1. 4. 2016 [cit. 17. 5. 2017]. Dostupné z: <http://www.mitcalc.com/doc/shaftconf/help/cz/shaftconf.htm>
- [4] ZELENÝ, Jiří. *Stavba strojů - strojní součásti: učebnice pro střední průmyslové školy*. Vyd. 2. Praha: Computer Press, 2003, 157 s.; 23 cm. ISBN 80-7226-311-0.
- [5] KOLBÁBEK, Lukáš. *Hydraulické lisy současné produkce*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2010.
- [6] DVOŘÁK, Jaroslav. *Moderní trendy ve výrobě vstřikovacích lisů*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2008.
- [7] DONINI, R., 2007. Elektrické vstřikovací lisy dobývají svět. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: Vogel Publishing, 1997. 2007, č.1 [cit. 10. 5. 2017]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://m.mmspektrum.com/clanek/elektricke-vstrikovaci-lisy-dobývaji-trh>
- [8] The Lee Company, 2017 [online]. 2017 [cit. 10. 5. 2017]. Dostupné z: <http://www.theleeco.com/plugs/plugs-performance.cfm>
- [9] Stanley Engineered fastening, 2017 [online]. 2017 [cit. 10. 5. 2017]. Dostupné z: <http://www.stanleyengineeredfastening.com/brands/avdel/products/sealing-plugs/avseal-ii>
- [10] Bareš, Karel, et al. *Lisování*. Redaktor Jindřich Klůna, 1. vyd Praha: SNTL, 1971. 544s. ISBN 04-234-71
- [11] REICHL, J., 2006, *Encyklopedie fyziky* [online]. 2017 [cit. 10. 5. 2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/36-smykove-treni>
- [12] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. (Richard Gordon) BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTUM, 2010, xxv, 1159 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [13] ŠIŠKA, Adam. *Systém common rail v osobních automobilech*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009.
- [14] KLEPETKO, David. *Optimalizace kovaných vysokotlakých elementů zásobníku paliva systému common rail*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009.
- [15] E-konstruktor, 2013 [online]. 2013 [cit. 14. 5. 2017]. Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>
- [16] ONDRÁČEK, Emanuel. *Mechanika těles: pružnost a pevnost. II*. Vyd. 4., přeprac., V Akademickém nakladatelství CERM 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 262 s. : il. ISBN 80-214-3260-8

Obr. 1.1 Vlevo: Instalace Lee Plug do otvoru, vpravo: detail drážkování.....	14
Obr. 1.2 Instalace Avseal zátky.....	15
Obr. 1.3 Systém vstřikování paliva Common Rail.....	17
Obr. 1.4 Způsob činnosti vstřikovače s elektromagnetickým ventilem.....	18
Obr. 3.1 Vlevo: Schéma lisování, vpravo: Upnutí vstřikovače v přípravku hydraulického lisu	20
Obr. 3.2 Upnutí vstřikovače v přípravku v elektrickém lisu	21
Obr. 3.3 Detail umístění otvoru pro kuličku na vstřikovači a vyznačení měřených parametrů	22
Obr. 3.4 Napárování kusů podle přesahu pro Test č. 1: Ověření vlivu lisů	23
Obr. 3.5 Napárované kusy podle přesahu pro Test č. 2: Ověření vlivu lisovacích rychlostí	23
Obr. 3.6 Napárované kusy podle přesahu pro Test č. 3: Ověření vlivu mazadel	24
Obr. 3.7 Vyznačení řezných rovin, odřezek pro vylisovací test.....	25
Obr. 3.8 Schéma vylisování kuličky.....	25
Obr. 3.9 Upnutí odřezku při vylisování.....	25
Obr. 4.1 Test č. 1 - Lisovací křivky.....	27
Obr. 4.2 Síla v prvním okně – vstup.....	29
Obr. 4.3 Síla v prvním okně - výstup	29
Obr. 4.4 Síla v druhém okně - vstup.....	30
Obr. 4.5 Síla v druhém okně - výstup.....	30
Obr. 4.6 Vylisovací křivky	31
Obr. 4.7 Závislost maximální vylisovací síly na přesahu.....	32
Obr. 4.8 Test č. 2 - Lisovací křivky.....	33
Obr. 4.9 Síla v prvním okně – vstup.....	34
Obr. 4.10 Síla v prvním okně – výstup.....	34
Obr. 4.11 Síla v druhém okně – vstup	35
Obr. 4.12 Síla v druhém okně – výstup	35
Obr. 4.13 Vylisovací křivky	36
Obr. 4.14 Závislost maximální vylisovací síly na přesahu.....	36
Obr. 4.15 Test č. 3 - Lisovací křivky.....	38
Obr. 4.16 Síla v prvním okně – vstup.....	39
Obr. 4.17 Síla v prvním okně – výstup.....	39
Obr. 4.18 Síla v druhém okně – vstup	40
Obr. 4.19 Síla v druhém okně – výstup	40
Obr. 4.20 Vylisovací křivky	41
Obr. 4.21 Závislost maximální vylisovací síly na přesahu.....	41
Obr. 4.22 Schéma spojení hřídele a náboje nalisováním, vlevo: před montáží, vpravo: po montáží.....	42
Obr. 4.23 Schéma zalisované kuličky v otvoru.....	43
Obr. 4.24 Srovnání otvorů před a po vylisování kuliček.....	44
Obr. 5.1 Detail otvoru s kuličkou a deformace stěny po zalisování kuličky.....	47

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 Generace čerpadel a vstřikovačů systému Common Rail.....	17
Tab. 4.2 Kontrolní okna určující správný průběh lisování	26